

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій**

«На правах рукопису»

УДК _____

До захисту допущено:

В.о.завідувача кафедри

_____ Володимир ЄРЕМЕНКО

« ____ » _____ 2020 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Інформаційні вимірювальні
технології екологічної безпеки»**

зі спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

**на тему: «Система контролю дисперсності атмосферного повітря на базі
безпілотного літального апарату»**

Виконав:

студент II курсу, групи ПН-391мп

Юник Вадим Вадимович _____

Керівник:

Професор, д.т.н.

Защепкіна Наталія Миколаївна _____

Консультант з «Розроблення стартап-проекту»:

Доцент, д.е.н.,

Бояринова Катерина Олександрівна _____

Консультант із нормоконтролю:

Доцент, к.т.н.,

Божко Костянтин Михайлович _____

Рецензент:

Старший викладач, к.т.н.,

Богдан Галина Анатоліївна _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Приладобудівний факультет

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Освітньо-професійна програма Інформаційні вимірювальні технології екологічної безпеки

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Володимир ЄРЕМЕНКО

«___» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

**на магістерську дисертацію студенту
ЮНИКА ВАДИМА ВАДИМОВИЧА**

1. Тема дисертації «Система контролю дисперсності атмосферного повітря на базі безпілотного літального апарату», затверджена наказом по університету від “___” _____ 2020р. № _____
2. Термін здачі оформленої дисертації “3” грудня 2020 р.
3. Об’єкт дослідження – контроль дисперсних показників атмосферного повітря вимірювачем мало кутового розсіювання на базі аеромобільної безпіотної платформи.
4. Предмет дослідження – конструктивні особливості системи контролю дисперсних показників атмосферного повітря та апробація методики проведення вимірювань.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити
 - 5.1. Теоретичні дослідження:
 - 5.1.1. Аналіз складу атмосферного повітря та фізико-хімічні характеристики часток диспергованих в повітряному середовищі.
 - 5.1.2. Огляд методів та засобів контролю зважених у повітрі часток.
 - 5.1.3. Характеристика методики малокутового розсіювання в контролі дисперсних показників часток атмосферного повітря
 - 5.1.4. Вибір аеромобільної платформи, придатної для розміщення вимірювача дисперсних часток атмосферного повітря.
 - 5.1.5. Вибір структурних елементів вимірювача дисперсних показників зважених у повітрі часток.
 - 5.2. Експериментальні дослідження:

- 5.2.1. Виконати підбір компонентів прокачної системи вимірювального модулю аеромобільного макету для контролю дисперсних показників атмосферного повітря.
- 5.2.2. Обґрунтувати застосування витратоміра, термокомпенсаційного датчику та датчику вологості у складі вимірювача зважених у повітрі часток.
- 5.2.3. Провести апробацію мало кутового вимірювача дисперсності повітря із застосуванням напівпровідникової фотодіодної лінійки у якості фотодетектору.
- 5.2.4. Провести вимірювання дисперсних показників атмосферного повітря.
- 6.1 Опублікувати 1 статтю в науковому журналі.
- 6.3 Підготувати 1 доповідь із публікацією тез конференції.
7. Перелік ілюстративного матеріалу (Зарк.)
- 7.1 Таблиці з результатами вимірюваних показників зважених у повітрі часток.
- 7.2. Структурна схема малокутового вимірювача дисперсності повітря.
- 7.3. Функціональна схема аеромобільної платформи.
8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
РОЗДІЛ 1. АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ ЯК ОБ'ЄКТ КОНТРОЛЮ	Защепкіна Н.М., доктор технічних наук, професор	10.09.2019	10.09.2020
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ЗВАЖЕНИХ ЧАСТОК АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ.	Защепкіна Н.М., доктор технічних наук, професор	24.09.2019	24.09.2020
РОЗДІЛ 3. КОНТРОЛЬ ДИСПЕРСНОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВИМІРЮВАЛЬНИМ МАКЕТОМ НА БАЗІ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ.	Защепкіна Н.М., доктор технічних наук, професор	17.10.2020	17.10.2020
РОЗДІЛ 4. СТАРТАП ПРОЕКТ «ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНТРОЛЮ ДИСПЕРСНОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ НА БАЗІ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ»	Бояринова К.О., доктор економічних наук, доцент	21.10.2020	21.10.2020

10. Дата видачі завдання 10 вересня 2020 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд літературних джерел та ресурсів мережі Інтернет по темі дослідження	до 20.09.2020 р.	виконано

2	Огляд та аналіз методів вимірювання зважених у повітрі твердих часток різної природи. Організація спостережень за рівнем забруднення атмосфери.	до 01.10.2020 р.	виконано
3	Принципи методики малокутового розсіювання в контролі дисперсних показників часток атмосферного повітря	до 15.10.2020 р.	виконано
4	Дослідження технічних характеристик аеромобільних платформ високої вантажопідйомності. Вибір аеромобільної платформи вимірювального комплексу.	до 01.11.2020 р.	виконано
5	Вибір витратоміра вимірювального макету. Оцінка вимірювання відносної вологості атмосферного повітря. Оцінка теплової інерційності термодатчика витратоміра.	до 05.11.2020р.	виконано
6	Обґрунтування вибору фотодетектору вимірювальної частини макету контролю дисперсності атмосферного повітря.	до 10.11.2020р.	виконано
7	Визначення інформативних показників мілко дисперсних часток за допомогою вимірювального макету	до 15.11.2020р.	виконано
8	Оформлення роботи в цілому та написання анотацій	до 25.11.2020 р.	виконано
9	Здача готової роботи для проходження нормо контролю та перевірки на плагіат.	до 01.12.2020 р.	виконано

Студент

Науковий керівник

Вадим ЮНИК

Наталія ЗАЩЕПКІНА

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Проблема забруднення повітря - одна з головних у багатьох мегаполісах і містах з великою промисловістю. З розвитком технологічного методу контролю за забрудненням повітря за допомогою безпілотних літальних апаратів став ефективніший контроль за допомогою передніх еколого-лабораторних лабораторій, так як БПЛА може дати повну картину, що виникає в будь-якій точці тримірного простору.

Необхідність контролю показників повітря особливо актуальна в наш час. Такий контроль проводиться в спеціальних аналітичних лабораторіях, де аналізують не тільки хімічні, а також біологічні та фізичні дані. При кожному дослідницькому інституті хімічного, металургійного чи геологічного виробництва присутні свої аналітичні лабораторії. Теж саме можна сказати про будь-яке виробничо-промислове підприємство. У цих лабораторіях багато дорогого та складного обладнання.

В останній час ситуація змінюється. Однією з найбільш важливих тенденцій розвитку аналітичної хімії, що виникає із загальновизнаними потребами практик, є поступове переміщення хімічного аналізу з лабораторії безпосередньо до розташування аналізованих об'єктів. Аналіз поза межами лабораторії здійснюється у глобальних масштабах у досить багатьох проектах, зокрема: у виявленні викидів природного газу або метану, у визначенні наявності зважених у повітрі часток при аналізі складу повітря у промисловій зоні та захищених об'єктах природокористування. Для аналізу «на місці» застосовуються різні засоби. У більшості випадків для такого аналізу використовуються дрони. По суті це те лабораторні вимірювачі, що більш стійкі до вібрацій, пилу, до перебоїв з електроживленням.

Дрони дозволяють проводити аналіз забруднення радіоактивними частками, аналіз хімічного забруднення повітря, викиду у повітря підприємствами, контроль дисперсних часток у повітрі.

Отримані результати співпоставляються з діючими санітарно-гігієнічними нормами. За результатом вимірювань рівня забруднення хімічних речовин та дослідження наявності в повітрі зважених часток проводиться висновок, яке описує санітарно-гігієнічний стан території на якій проводиться моніторинг.

Об'єкт дослідження – контроль дисперсних показників атмосферного повітря вимірювачем мало кутового розсіювання на базі аеромобільної безпілотної платформи.

Предмет дослідження – конструктивні особливості системи контролю дисперсних показників атмосферного повітря на базі аеромобільної платформи та апробація методики проведення вимірювань.

Мета роботи вдосконалення контролю дисперсних показників атмосферного повітря шляхом виміру інформативних показників зважених у ньому часток різної природи та шляхів походження.

Для досягнення мети було сформульовано наступні завдання:

- провести аналіз складу атмосферного повітря та фізико-хімічних характеристики часток диспергованих в повітряному середовищі;
- зробити огляд методів та засобів контролю зважених у повітрі часток.
- характеристика методики малокутового розсіювання в контролі дисперсних показників часток атмосферного повітря;
- вибір аеромобільної платформи, придатної для розміщення вимірювача дисперсних часток атмосферного повітря.
- вибір структурних елементів вимірювача дисперсних показників зважених у повітрі часток.
- виконати підбір компонентів прокачної системи вимірювального модулю аеромобільного макету для контролю дисперсних показників атмосферного повітря.
- обґрунтувати застосування витратоміра, термокомпенсаційного датчику та датчику вологості у складі вимірювача зважених у повітрі часток.

- провести апробацію малокутового вимірювача дисперсності повітря на базі аеромобільної платформи FalcoR18 із застосуванням напівпровідникової фотодіодної лінійки у якості фотодетектору.

- провести вимірювання дисперсних показників атмосферного повітря.

Наукова новизна роботи полягає в розробці засобу контролю інформативних показників зважених у повітрі часток вимірювачем малокутового розсіювання на базі аеромобільної платформи великої вантажопідйомності.

Практична цінність. Отримані результати апробації вимірювального макету на базі аеромобільної платформи показує актуальність розробленої вимірювальної системи та методики моніторингу дисперсних показників повітря відповідно до стандарту контролю часток PM_{2.5}:FSP та PM₁₀:FSP (fine suspended particles).

Апробація роботи. Підготовлено до друку та опубліковано статтю у профільному науковому виданні а також прийнято участь у науково-практичній конференції із публікацією тез доповіді.

1. Артемчук В.І..Актуальність біоенергетичного виробництва метану в Україні / В.І. Артемчук, В.В. Юник, О.А. Осипенко // Матеріали XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 08-09 грудня 2020 року., Київ, Україна, 2020. С.160-166.

2. Артемчук В.І. Контроль виходу метану у біоенергетичному виробництві /В.І. Артемчук О.В. Довга, В. В. Юник // Вісник Хмельницького національного університету, серія «Технічні науки». – 2020. – №5. – С.7-13.

Структура та обсяг роботи. Робота містить чотири розділи, висновків, 31 рисунку, 21 таблиць, списку використаних джерел із 39 позицій. Загальний обсяг роботи – 107 сторінок, з яких основна частина викладена на 104 сторінках.

Ключові слова: БПЛА, аеромобільна платформа, дисперсність повітря, зважені частки, малокутове розсіювання, витратомір, контроль.

ABSTRACT

Actuality of theme. The problem of air pollution is one of the main in many cities and cities with large industries. With the development of a technological method of controlling air pollution with the help of unmanned aerial vehicles, control with the help of front ecological and laboratory laboratories has become more effective, as UAVs can give a complete picture that arises at any point in three-dimensional space.

Many researchers use drones to monitor the air over power plants, sewage plants, factories and shops that operate illegally or in violation of pollutant emission restrictions. UAVs equipped with high-resolution cameras and a special sensor platform conduct research on gas emissions at facilities, monitoring the permissible level of concentration of pollutants.

The need to monitor air performance is especially relevant today. Such control is carried out in special analytical laboratories, which analyze not only chemical but also biological and physical data. Each research institute of chemical, metallurgical or geological production has its own analytical laboratories. The same can be said about any industrial enterprise. These laboratories have a lot of expensive and complex equipment.

Recently, the situation is changing. One of the most important trends in the development of analytical chemistry, which arises with the generally accepted needs of practitioners, is the gradual movement of chemical analysis from the laboratory directly to the location of the analyzed objects. Out-of-laboratory analysis is carried out on a global scale in many projects, in particular: in the detection of natural gas or methane emissions, in determining the presence of suspended particles in the air when analyzing the composition of air in industrial areas and protected areas. Various tools are used for "on-site" analysis. In most cases, drones are used for such analysis. In essence, these are laboratory meters that are more resistant to vibration, dust, power outages.

Drones allow the analysis of contamination by radioactive particles, analysis of chemical air pollution, air emissions by enterprises, control of dispersed particles in the air. The obtained results are compared with the current sanitary and hygienic norms. Based on the results of measurements of the level of chemical pollution and the study of the presence of suspended particles in the air, a conclusion is made, which describes the sanitary and hygienic condition of the territory where the monitoring is carried out.

The object of research - control of dispersed indicators of atmospheric air by the meter of small angular scattering on the basis of the airmobile unmanned platform.

The subject of the research is the design features of the control system of dispersed indicators of atmospheric air on the basis of the airmobile platform and approbation of the measurement technique.

The purpose of the work is to improve the control of dispersed indicators of atmospheric air by measuring the informative indicators of suspended particles of different nature and ways of origin.

To achieve this goal, the following **tasks** were formulated:

- to analyze the composition of atmospheric air and physicochemical characteristics of particles dispersed in the air;
- to review the methods and means of control of airborne particles.
- characteristics of the method of small-angle scattering in the control of dispersed indicators of atmospheric air particles;
- selection of an airmobile platform suitable for placing a meter of dispersed particles of atmospheric air.
- selection of structural elements of the meter of dispersed indicators of airborne particles.
- to select the components of the pumping system of the measuring module of the airmobile model for the control of dispersed indicators of atmospheric air.
- justify the use of a flow meter, thermal compensation sensor and humidity sensor in the meter of airborne particles.

- to test a small-angle air dispersion meter based on the FalcoR18 airmobile platform using a semiconductor photodiode line as a photodetector.
- to measure the dispersed indicators of atmospheric confidence.

The scientific novelty of the work lies in the development of a means of monitoring the informative indicators of airborne particles with a low-angle scattering meter on the basis of a high-capacity airmobile platform.

Practical value. The obtained results of approbation of the measuring model on the basis of the airmobile platform show the relevance of the developed measuring system and methods of monitoring of dispersed air indicators in accordance with the standard of particle control PM2.5: FSP and PM10: FSP (fine suspended particles).

Approbation of work. The article was prepared for publication and published in a specialized scientific publication, and also took part in a scientific-practical conference with the publication of abstracts.

1. Artemchuk VI. The relevance of bioenergy methane production in Ukraine / VI Artemchuk. Артемчук, В.В. Юник, О.А. Osipenko // Proceedings of the XVI All-Ukrainian scientific-practical conference "Efficiency and automation of engineering solutions in instrument making", PBF, KPI. Igor Sikorsky, December 8-09, 2020., Kyiv, Ukraine, 2020. P.160-166.

2. Artemchuk VI Methane yield control in bioenergy production /V.I. Artemchuk OV Dovha, VV Yunyк // Bulletin of Khmelnytsky National University, series "Technical Sciences". - 2020. - №5. - P.7-13.

Structure and scope of work. The work contains four sections, conclusions, 31 figures, 21 tables, a list of used sources from 39 positions. The total volume of the work is 107 pages, of which the main part is set out on 104 pages.

Key words: UAV, airmobile platform, air dispersion, suspended particles, low-angle scattering, flow meter, control.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1. АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ ЯК ОБ'ЄКТ КОНТРОЛЮ.....	14
1.1. Склад та стандарти якості атмосферного повітря.....	14
1.2. Організація спостережень за рівнем забруднення атмосфери.....	18
1.3. Фізико-хімічні особливості мікодисперсних чаток атмосферного повітря у вигляді аерозолів.....	21
Висновки до розділу 1.....	29
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ЗВАЖЕНИХ ЧАСТОК АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ.....	30
2.1. Акустичний метод вимірювання зважених часток в атмосферному повітрі.....	31
2.2 Метод абсорбційної фотометрії.....	32
2.3. Принципи методики малокутового розсіювання в контролі дисперсних показників часток атмосферного повітря.....	34
2.4. Залежність спектру розсіяного випромінювання від розмірних параметрів часток атмосферного повітря.....	36
2.5. Контроль дисперсних показників часток атмосферного повітря методом лазерної інтерферометрії.....	40
2.6. Обробка результатів вимірювань спектрів малокутового розсіювання.....	41
Висновки до розділу 2.....	43
РОЗДІЛ 3. КОНТРОЛЬ ДИСПЕРСНОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВИМІРЮВАЛЬНИМ МАКЕТОМ НА БАЗІ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ.....	44
3.1. Вибір аеромобільної платформи вимірювального комплексу.....	45
3.2. Технічні характеристики аеромобільних платформ високої вантажопідйомності.....	47

3.3. Конструктивні особливості вибраної аеромобільної бази вимірювального макету.....	55
3.4. Система управління, контролю та екологічного моніторингу аеромобільної платформи «FalcoR18».....	61
3.5. Конструктивні особливості вимірювального модулю контролю показників дисперсності атмосферного повітря.....	65
3.6. Вибір витратоміра вимірювального макету.....	68
3.6.1. Оцінка вимірювання відносної вологості атмосферного повітря.....	71
3.6.2. Оцінка теплової інерційності термодатчика витратоміра.....	74
3.7. Обґрунтування вибору фотодетектору вимірювальної частини макету контролю дисперсності атмосферного повітря.....	76
3.8. Вибір схеми включення фотодетектору вимірювача дисперсних показників повітря.....	77
3.9. Визначення вимірювальних параметрів в контролі дисперсних показників атмосферного повітря.....	79
3.10. Визначення дисперсних показників атмосферного повітря вимірювальною системою на базі аеромобільної платформи R18 Falco.....	82
Висновки до розділу 3.....	86
РОЗДІЛ 4. СТАРТАП ПРОЕКТ «ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНТРОЛЮ ДИСПЕРСНОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ НА БАЗІ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ».....	87
4.1 Опис ідеї проекту.....	87
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	89
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту.....	90
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	96
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	97
4.6 Висновки до розділу 4.....	100
ВИСНОВКИ.....	102
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	105

ВСТУП

Розвиток багатьох галузей промисловості супроводжується значним збільшенням виготовлення і використання порошкоподібних матеріалів. Майже всі тверді і рідкі палива спалюються у вигляді пилу і туману. Перетворення матеріалів у порошкоподібний стан є основною технологічною операцією у різних галузях промисловості.

Великий відсоток порошкоподібних матеріалів у процесі виготовлення, транспортування та переробки під дією повітряних та газових потоків переходить в аерозольний стан, утворюючи пил - побутовий, заводський, вуличний та атмосферний, кількість якого та шкода, що наноситься людині, безперервно збільшуються. Багато речовин, які присутні й широко використовуються в сучасних виробничих процесах, мають у такому стані отруйні та навіть вибухонебезпечні властивості. Тому важко переоцінити важливість контролю параметрів аерозолів у моніторингу атмосферного повітря.

Аналіз властивостей аерозолів має також велике гігієнічне значення при оцінці ступеню їх отруйності. Частинки пилу більше за 5 мкм затримуються у верхніх шляхах дихання. Більш дрібні частинки проникають у нижні дихальні шляхи і впливають на збільшення гострих респіраторних захворювань. Фракції пилу 0,1-1 мкм досягають альвеол легень, і затримуючись в них, можуть призвести до тяжких захворювань

Багато дослідників використовують дрони для моніторингу повітря над електростанціями, очисними заводами, фабрикою та цехом, що працюють нелегально або порушуючи обмеження щодо викидів забруднюючих речовин. БПЛА оснащені камерами з високою роздільною здатністю та спеціальною платформою датчиків проводять дослідження викидів газу на об'єктах, контролюючи допустимий рівень концентрації забруднюючих речовин та дисперсний склад атмосферного повітря.

РОЗДІЛ 1. АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ ЯК ОБ'ЄКТ КОНТРОЛЮ

Забруднення атмосфери впливає на життя мільйонів людей у всіх районах світу, особливо тих, які проживають у великих індустріальних центрах з високою щільністю руху автомобільного транспорту. Неприємні запахи і дими; погіршення видимості; шкідлива дія забруднювачів на здоров'я населення, врожаї зернових культур та інші форми рослинності; збиток, що наноситься пилом і корозійними газами різним видам майна, - всі ці питання стоять в ряду основних проблем, пов'язаних із забрудненням навколишнього середовища в міських індустріальних центрах і прилеглих районах.

Більшість людей згодні миритися з деяким погіршенням навколишнього середовища, якщо це компенсується більш високим рівнем життя і достатком товарів широкого споживання. Однак у міру зростання життєвого рівня антропогенне забруднення повітря є спочатку просто подразником, а потім – прямою загрозою якості життя.

Надмірне забруднення становить небезпеку для здоров'я населення, деякі види забруднень можуть навіть створювати в ряді районів умови, непридатні для нормального проживання, що становить серйозну перешкоду на шляху соціально-економічного розвитку цих областей.

Таким чином, багато національні, регіональні та міські адміністративні органи стикаються тепер із збільшеним вимогою громадськості забезпечити боротьбу з забрудненням атмосферного повітря.

1.1. Склад та стандарти якості атмосферного повітря

Повітря в основному складається з азоту (78,08 заг.%), кисню (20,95 заг.%), значно меншої кількості інертного газу аргону (0,93 заг.%) і ще меншого – вуглекислого газу (0,03 заг.%). Крім цих постійних компонентів повітря, важливим компонентом є також водяна пара, вміст якої змінюється

від 0 заг. % в сухому повітрі до 4 заг. % у вологому повітрі. Основна маса водяної пари міститься в нижніх шарах (до 6 км) атмосфери, в стратосфері вона практично відсутня [1].

Для збереження чистоти атмосфери необхідний ретельний і дієвий контроль ступеня забруднення повітря. Ступінь забруднення атмосферного повітря сильно коливається в часі і просторі і визначається наступними факторами:

- особливостями джерел емісії забруднювачів (тип джерела, природа і властивості забруднюючих повітря речовин, обсяг викиду);
- впливом метеорологічних і топографічних факторів (напрямок і швидкість вітру, температурні інверсії, атмосферний тиск, вологість повітря, рельєф місцевості і відстань до джерела забруднення).

Для боротьби із забрудненням атмосферного повітря необхідні стандарти якості повітря (гранично допустимі концентрації – ГДК), на базі яких здійснюються всі заходи по збереженню чистоти навколишнього середовища. Наявність стандартів якості повітря дозволяє спрямовувати зусилля по оздоровленню атмосферного повітря більш раціонально, тобто на заходи в тих регіонах, де рівень забруднення повітря перевищує ГДК.

Для санітарної оцінки повітряного середовища використовують такі види гранично допустимих концентрацій [2]:

$ГДК_{рз}$ - гранично допустима концентрація шкідливої речовини в повітрі, що виражається в $мг/м^3$

$ГДК_{дг.}$ – гранично допустима концентрація шкідливої речовини на території промислового виробництва (зазвичай приймається $ПДК_{пв} = 0,3 ГДК_{рз}$);

ОБРВ – орієнтовно безпечні рівні впливу (для хімічних речовин, на які ГДК не встановлено, повинні переглядатися через кожні два роки з урахуванням накопичення даних про здоров'я працюючих або замінюватися ГДК);

$ТДК_{рз}$ – тимчасово допустима концентрація хімічної речовини в повітрі робочої зони (тимчасовий галузевий норматив на 2-3 роки);

$ОДК_{рз}$ – орієнтовно допустима концентрація хімічної речовини в повітрі;

$ГДК_{нпю}$ – гранично допустима концентрація шкідливої речовини в атмосферному повітрі населеного пункту (в повітрі населених місць визначають $ПДК_{мр}$ і $ПДК_{сд}$);

При встановленні $ГДК_{рз}$ і $ГДК_{нп}$ враховується різний характер впливу речовини на людину в умовах виробництва і в населеному місці. При визначенні впливу речовини в робочій зоні знаходяться практично здорові, дорослі люди, і час дії обмежено довжиною робочого дня і робочим стажом.

При визначенні $ГДК_{нп}$ обліку підлягають інші чинники; береться до уваги, що речовина впливає цілодобово і протягом усього життя на всіх людей (дорослих і дітей, здорових і хворих). Тому для одного і того ж забруднювача $ГДК_{рз}$ в десятки і навіть сотні разів вище, ніж $ГДК_{нп}$.

Схематично класифікація $ГДК$ шкідливих речовин в повітряному середовищі показана на рис. 1.1.

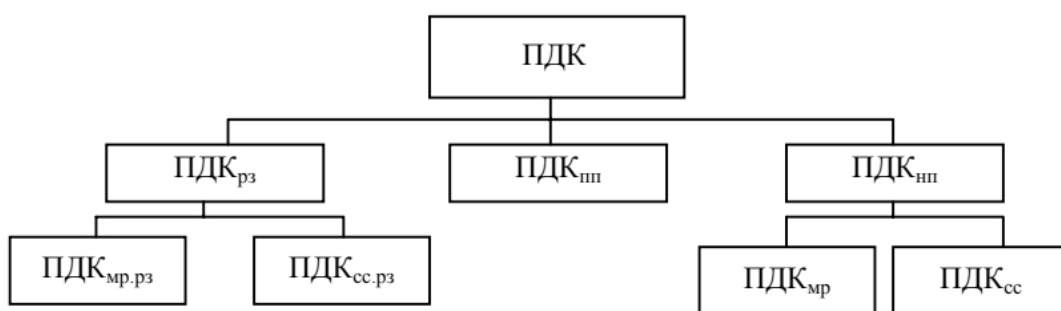


Рис. 1.1 – Класифікація $ГДК$ шкідливих речовин в повітряному середовищі [4].

Атмосферні забруднювачі за класифікацією шкідливих речовин за ступенем токсичності і небезпеки відносяться до чотирьох класів небезпеки:

1-й клас – надзвичайно небезпечні (бензопірен, свинець та його сполуки);

2-й клас – високонебезпечні (NO_2 , H_2S , HNO_3);

3-й клас – помірно небезпечні (пил неорганічна, сажа, SO_2);

4-й клас – малонебезпечні (бензин, CO).

Оцінка якості атмосферного повітря заснована на порівнянні фактично виміряної концентрації з ГДК.

При одночасній присутності кількох забруднюючих речовин, що володіють ефектом сумачії, їх безрозмірна концентрація X не повинна перевищувати одиницю [8]:

$$X = \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{ГДК_i} \leq 1 \quad (1.1)$$

Чим більше кратність перевищення ГДК, тим гірше якість повітря. Чим вище безрозмірний показник X для речовин з адитивними діями, тим гірше якість повітря.

На практиці в повітрі є, як правило, кілька забруднюючих речовин. Тому для оцінки якості повітря застосовується комплексний показник I – індекс забруднення атмосфери (ІЗА), який дорівнює сумі нормованих по ГДК і приведених до концентрації діоксиду сірки середніх вмістів забруднюючих речовин (табл. 1.1.) [9].

Для одної речовини:

$$I = \left(\frac{\bar{c}}{ГДК_{сд.}} \right)^k \quad (1.2)$$

де \bar{c} – середня за рік концентрація, мг/м^3 ;

$ГДК_{сд.}$ – середньодобова ГДК, мг/м^3 , в разі відсутності замість неї приймається $ГДК_{мр}$ або ОБРВ;

$k = 1,7$ (клас безпеки 1); $k = 1,3$ (клас безпеки 2); $k = 1,0$ (клас небезпечності 3); $k = 0,9$ (клас безпеки 4).

Для кількох речовин індекс забруднення атмосфери (ІЗА) визначається як арифметична сума забруднювачів:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i = \left(\frac{c_i}{ГДК_{сд.}} \right)^{k_i} \quad (1.3)$$

Таблиця 1.1 – Шкала екологічного стану атмосфери [9].

Клас екологічного забруднення атмосфери	<i>I</i>
Норма	<5
Ризик	5-8
Криза	8-15
Небезпека	>15

Класи екологічного стану атмосфери визначають по чотирибальній шкалі (табл. 1.1), де клас норми відповідає рівню забруднення нижче середнього за шкалою, клас ризику дорівнює середньому рівню, клас кризи вище середнього рівня. Ранжування екологічного стану атмосфери за класами здійснюється через розрахунок комплексного індексу забруднення атмосфери.

В Україні здійснюється постійний санітарний контроль за дотриманням ГДК токсичних речовин та зважених часток в атмосфері та гранично допустимих викидів (ГДВ) промислових підприємств, що проводяться хіміками санітарно-епідеміологічних станцій (СЕС) і санітарно-гігієнічних лабораторій промислових підприємств.

1.2. Організація спостережень за рівнем забруднення атмосфери

Спостереження за рівнем забруднення атмосфери здійснюється на постах. Одночасно з відбором проб повітря визначають наступні метеорологічні параметри: напрямок і швидкість вітру, температуру повітря, стан погоди і підстильної поверхні.

При визначенні приземної концентрації домішки в атмосфері відбір проб і вимірювання концентрації домішки проводяться на висоті 1,5 ... 3,5 м від поверхні землі. Тривалість відбору проб повітря для визначення середньодобових концентрацій забруднюючих речовин при дискретних спостереженнях за повною програмою становить 20...30 хв, при

безперервному відборі – 24 г. Тривалість метеорологічних спостережень становить 10 хв [9].

Істотним етапом санітарно-хімічних досліджень повітряного середовища робочої зони є відбір проби повітря для визначення вмісту мікродомішок токсичних сполук. Результати найточнішого і ретельно виконаного аналізу втрачають сенс в разі неправильної підготовки до відбору проби і невірної його виконання. Тому при розробці методів контролю цього етапу приділяють велику увагу.

Проби повітря слід відбирати з урахуванням особливостей температурного режиму, кількості хімічних речовин що виділяються, фізико-хімічних властивостей контрольованих речовин, їх агрегатного стану в повітрі, летючості, тиску парів і можливості їх перетворення (окислювання, гідроліз, деструкція та ін.); температури і вологості навколишнього середовища; класу небезпеки і біологічної дії хімічної сполуки.

При наявності в повітрі декількох хімічних речовин або складних багатокомпонентних сумішей невідомого складу необхідно попередньо провести ідентифікацію сумішей і визначити пріоритетні – найбільш небезпечні і характерні компоненти, на які слід орієнтуватися при оцінці стану повітряного середовища.

Контроль за дотриманням $\text{ПДК}_{\text{мр}}$ і ОБРВ проводять при безперервному або послідовному відборі протягом 15 хв в будь-якій точці території моніторингу. Якщо межа виявлення методу аналізу дає можливість протягом 15 хв. відібрати не одну, а декілька проб повітря, то потрібно проводити усереднення результатів на рівні $0,5 \text{ ГДК}_{\text{мр}}$. За 15 хв, допускається збільшення тривалості відбору проб до 30 хв [2, 4]. При санітарно-гігієнічних дослідженнях атмосфери відбір проб необхідно проводити з урахуванням погодніх та метеорологічних умов, а також з урахуванням тривалості виділення найбільшої кількості токсичних речовин.

Для отримання достовірних результатів при дослідженнях повітряного середовища має бути послідовно відібрано не менше п'яти проб повітря.

Обчислюють середнє арифметичне значення (концентрація c , мг/м³) і довірчий інтервал (ε ,%) [8]:

$$c = \frac{c_1 + c_2 + \dots + c_n}{n} \quad (1.4)$$

$$\varepsilon = \frac{(c_{\max} - c_{\min}) \cdot 75}{c} \quad (1.5)$$

де, c_1, c_2 – концентрація в окремих пробах;

c_{\max} - максимальна концентрація в відібраних пробах;

c_{\min} - мінімальна концентрація у відібраних пробах.

Якщо отримане значення довірчого інтервалу дорівнює або менше 25%, то значення середнього арифметичного вважається достовірним. Якщо обчислений довірчий інтервал перевищує 25%, повинні бути відібрані додаткові проби. Отриманий результат порівнюють з величинами ГДК_{мр}.

У нових або раніше невивчених в гігієнічному плані територіях моніторингу, повітряне середовище, яка може забруднюватися токсичними речовинами, санітарний контроль слід виконувати методом орієнтовних точок, що рівномірно заповнюють територію моніторингу. На основі даних по дослідженню забруднення повітря визначають найбільш несприятливі в санітарно-гігієнічному відношенні точки досліджуваної території, на яких в подальшому відбирають проби повітря. Періодичність відбору проб повітря для кожної речовини в кожній точці встановлюють залежно від характеру показників що підлягають контролю.

При відсутності приладів безперервного контролю при узгодженні з органами санітарного нагляду до пускається в якості тимчасового заходу періодичний відбір проб повітря для визначення речовини з гостронаправленим механізмом дії. Контроль за дотриманням ГДК передбачений для речовин, які мають відповідний норматив

Вибір способу відбору зазвичай визначається природою аналізованих речовин, наявністю супутніх домішок і іншими факторами. Для

обґрунтованого вибору способу відбору проб необхідно мати чітке уявлення про можливі форми знаходження токсичних домішок в повітрі.

Мікродомішки шкідливих речовин в повітрі можуть перебувати у вигляді газів (аміак, дівиніл, озон і ін.), у вигляді пари - переважно речовини, що представляють собою рідину з температурою кипіння до 230-250°C (ароматичні хлоровані і аліфатичні вуглеводні, нижчі ациклічні спирти, кислоти і ін.), а також деякі тверді речовини, що володіють високою летючість (йод, нафталін, фенол). Іноді речовини можуть перебувати в повітрі одночасно у вигляді пари та твердих зважених домішок у формі аерозолів. Оптимальний об'єм повітря V , що потрібний для знаходження ГДК аналізованої домішки із заданою точністю, можна розрахувати за наступною формулою [7]:

$$V = \frac{aV_0}{V_n K C_{ГДК}} \quad (1.6)$$

де a – нижня межа виявлення в уже згадуваному обсязі проби, мкг;

V_0 – загальний обсяг проби, см³;

V_n – обсяг проби, взятий для аналізу, см³;

$C_{ГДК}$ – гранично допустима концентрація, мг/м³;

K - коефіцієнт, що відповідає часткам ГДК (1/4, 1/2, 1 ГДК і т.д.).

Аспірація зайвих обсягів повітря призводить до невиправданих втрат робочого часу, при недостатньому обсязі повітря знижується точність аналізу, а іноді взагалі виявляється неможливим проведення кількісних визначень.

1.3. Фізико-хімічні особливості мікодисперсних чаток атмосферного повітря у вигляді аерозолів

Під аерозолями розуміють конденсаційні системи, які складаються з дисперсних аерозольних частинок (твердих, рідких або газоподібних) і газового дисперсійного середовища. Дисперсна фаза аерозолів – це

сукупність аерозольних часток, що включають частки з величезним діапазоном, розміром від 0,001 до 100 мкм. Фізичні властивості аерозолів та характеристики газових потоків суттєво впливають на ефективність пилоочисних установок і їх вибір. Велике значення має також визначення властивостей і характеристик аерозолів, пилу і газів, що виділяються при виробництві різних матеріалів [13].

Вже давно і достатньо надійно встановлено вплив аерозолі природного походження на клімат. Останнім часом накопичується все більше даних про значний зріст інтенсивності викидів в атмосферу індустріальних аерозолів. В таблиці 1.2 представлено порівняльну характеристику про роль різноманітних джерел аерозольних часток, які можуть використовуватись для приблизної характеристики ролі окремих джерел. Дуже важливим при цьому є проблема роздільної оцінки внесків індустріальних і природних джерел аерозолів [2].

Таблиця 1.2 – Аналіз джерел викидів в атмосферу часток радіусу <20 мкм.

Джерела	10 ⁹ кг/рік
Частки ґрунту і гірських порід (вивітрювання)	100-500
Продукти лісових пожеж і спалювання сільськогосподарських залишків	3-150
Сіль морського походження	300
Вулканічний туф та попел	20-150
Частки, що утворені внаслідок емісій газів та послідовних реакцій:	
Сульфати з H ₂ S	130-200
Солі аміаку з NH ₃	80-270
Вуглеводні сполуки, які є продуктами життєдіяльності	75-200
Частки, що утворені внаслідок газового забруднення:	
Сульфат з SO _x	130-200
Вуглеводні сполуки	15-90
Нітрати з NO _x	30-35

Дуже важливим при цьому є проблема роздільної оцінки внесків індустриальних і природних джерел аерозолів.

В таблиці 1.3 приведена характеристика компонентів природних джерел атмосферного забруднення

Таблиця 1.3 Компоненти і джерела атмосферного забруднення [5].

Забруднювач	Джерело походження
CO ₂	вулкани, спалювання палива, тварини
Окис вуглецю	двигуни внутрішнього згорання, вулкани
Сполуки сірки	бактерії, спалення палива, вулкани, випарювання морських бризок
Сполуки N	бактерії, горіння
Мілкодисперсні частки	вулкани, вітряна ерозія, горіння, промислова обробка, метеори, випарювання краплин морських бризок, лісові пожежі

Зазначимо, що дим є одним із представників аерозолів. При пожежі, виділяється дим, що містить попел у вигляді зважених у повітрі часток та токсичні гази. Якщо довго немає захисту від диму, то його дія може привести до смертельних випадків.

Таблиця 1.4 Характеристика відношення між компонентами забруднення природного та антропогенного походження [1].

Компонент	Вміст компонентів кг/рік	
	природних	антропогенних
O ₃	$1,8 \cdot 10^{12}$	мало
CO ₃	$7,2 \cdot 10^{13}$	$1,4 \cdot 10^{12}$
H ₂ O	$4,5 \cdot 10^{17}$	$9 \cdot 10^{12}$
CO	-	$1,8 \cdot 10^{11}$
S	$1,3 \cdot 10^{11}$	$6,8 \cdot 10^{10}$
N	$1,4 \cdot 10^{12}$	$1,8 \cdot 10^{10}$

Вивчення аерозолів важливе внаслідок наступних чинників:

- як фактора забруднення атмосфери;
- як фактора, що викликає модифікаційні процеси перетворень аерозольних часток в атмосфері;
- вплив аерозолію на електричні властивості атмосфери.

Запиленість чи концентрацію зважених часток у газі визначають як масу цих частинок, виражену в грамах і що міститься в 1 м^3 реального газу (г/м^3) або зведеного до стандартних умов, якими є: температура - 0°C , тиск $0,1 \text{ МПа}$ (1 кгс/см^2), вологість - 0% . Запиленість газів визначають прямим або непрямим методами. При прямому методі за допомогою вітродувки або ежектора відбирають пробу запиленого газу і зважують обложені частки, а потім підраховують ставлення їх маси до одиниці об'єму газу [12].

Одночасно визначають температуру, тиск і вологість газу. У приладах, застосовуваних для визначення запиленості непрямыми методами, використовують залежність ступеня поглинання світлових променів, здатність частинок сприймати електричний заряд і т.д. від концентрації пилу в газі; попередньо тарують ці прилади по прямому методу. Дисперсійний склад аерозольних частинок – це характеристика їх за розмірами, що визначаються залежно від швидкості їх осадження в рідині або газі. На ефективність роботи пиловловлювачів впливає швидкість осадження цих частинок, що залежить в свою чергу від їх розміру, а також від типу апарату.

У пиловловлювачах, де частки осідають в основному під дією сили тяжіння (пилоосаджувальні камери, шахти тощо), швидкість осадження визначають за допомогою формули Стокса, справедливої майже для всіх розмірів, що містяться в аерозолях підприємств будівельних матеріалів.

У міру падіння частинки, що має кульову (або близьку до неї) форму, швидкість її збільшується, але одночасно зростає і опір середовища, і настає момент (в першу чергу для дрібних частинок) рівності сили тяжіння і сили опору. З цього моменту частка падає по інерції з постійною швидкістю, яку

можна визначити, порівнюючи силу тяжіння, що діє на частинки, до сили опору газового середовища [13].

Ця швидкість називається швидкістю витання, тобто вільного падіння частинок у нерухомому повітрі. У циклонах та інших апаратах, в яких осадження частинок визначають на підставі рівності відцентрової сили, що виникає при обертанні запиленого потоку. Отже, швидкість осадження частинок в цих апаратах також пропорційна квадрату діаметру частинок. Швидкість осадження частинок в пиловловлювачах мокрого типу, а також у фільтрах, за експериментальними даними, пропорційно діаметру частинок. При знепилюванні газів в електрофільтрах на тверді частинки діє кулонівська сила.

Щільність твердих частинок - маса одиниці об'єму (в кг/м або в м/см) – характеризує швидкість осадження аерозольних часток при знепилюванні в сухих інерційних, відцентрових і гравітаційних апаратах; швидкість осадження частинок з більш високою щільністю вище. Розрізняють справжню, насипну і гадану щільність пилу. Насипну щільність пилу, на відміну від істинної, визначають з урахування повітряних зазорів між частинками пилу. Цією величиною користуються для визначення обсягу бункерів пиловловлювачів.

В'язкість газів – характеризується силою тертя твердих частинок в газі, що виникає при осадженні, а їх щільність масою одиниці об'єму.

Щільність і в'язкість газів залежить від їх температури і тиску. Щільність і в'язкість димових газів, що утворюються при спалюванні палива, з достатньою для практики точністю може бути прийнята рівною щільності й в'язкості повітря, що знаходиться в однакових по температуру і тиску умовах.

Для сухих гравітаційних і інерційних апаратів верхня межа температури газів визначається межею механічної міцності матеріалу, з якого виготовлені апарати. Верхня межа температури вхідних газів для рукавних фільтрів залежить від термостійкості матеріалу рукавів. Межі температури

газів, що надходять в мокрі пиловловлювачі, встановлюють відповідно до технології виробництва і способами використання обложеного продукту.

Нижня межа температури газів при виході з сухих пиловловлювачів залежить від складу газів і визначається температурою конденсації (точкою роси) водяної пари, парів кислот та ін.. Відповідно цьому, щоб уникнути злипання поверхонь осадження і стінок шахт, циклонів, електродів, рукавів і т.д.), а також їх корозії, температура газів при виході з пиловловлювачів повинна бути вище точки роси зазначених парів не менше ніж на 20-30°C.

Питомий електричний опір пилу - дорівнює опорі її при товщині шару їм; Він залежить від хімічного, мінерального та дисперсного складу, кількості і складу адсорбованих на частинках молекул газу і головним чином від температури і вологості газового середовища.

За питомим електричним опором і характером впливу на ефективність електрофільтрів пил наближено ділять на три групи [7]:

1) Пил з високою провідністю при осадженні на електрод, негайно ж віддає свій заряд, перезаряджається і відштовхується в газовий потік;

2) Пил з електричним опором ефективно осідає в електрофільтрах;

3) Пил з низькою провідністю погано вловлюється електрофільтрами;

Вологість газу - найчастіше характеризують такі величини:

1) Концентрація водяної пари (абсолютна волога) сухого газу;

2) Концентрація водяної пари вологого газу за стандартних умов;

3) Відносна вологість, тобто відношення маси водяної пари, що міститься в 1 м³ вологого газу, до маси водяної пари, який може міститись в 1 м³ газу при стані насичення.

Дисперсність частинок. Розмір частинок, мабуть, є основним її параметром, так як вибір пиловловлювача того чи іншого типу визначається, головним чином, дисперсним складом пилу.

У процесі коагуляції первинні частинки пилу об'єднуються в агломерати, тобто укрупнюються. Тому в техніці призначеній для газового очищення велике значення має так званий стоксовський розмір, що

представляє собою діаметр сферичної частинки, що має таку ж швидкість осадження (седиментації), як і дана несферична частка або агрегат [11].

Дисперсний склад пилу можна представити у вигляді утримання за кількістю або за масою частинок різних фракцій. Фракцією вважають сукупність частинок що відносяться до певного розмірного діапазону. Більшість промислових пилів підпорядковується нормально-логарифмічному закону розподілу частинок за розмірами. у цьому випадку інтегральна крива розподілу частинок за розмірами може бути виражена аналітично [15]:

$$D(d_q) = \frac{100}{\lg \sigma_n \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\lg \sigma_n \frac{\lg^2 \frac{d_q}{d_M}}{2 \lg^2 \sigma_n}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \lg d_q \quad (1.7)$$

де, $D(d_q)$ - відносний вміст частинок менше даного розміру d_q ;

$\lg(\sigma_q)$ – середньоквадратичне відхилення у функції даного розподілення;

$\lg^2 \frac{d_q}{d_M}$ - логарифм відношення поточного розміру d_q до медіанного для

даного розподілу розміром d_M , який являє собою такий розмір, при якому число частинок більших сім дорівнює числу часток дрібніше сім. При підстановці у формулу (1.8) величини:

$$t = \frac{\lg \frac{d_q}{d_M}}{\lg \sigma_q} \quad (1.8)$$

отримуємо рівняння кривої розподілу часток за розмірами:

$$D(d_q) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (1.9)$$

Розглянемо забруднення атмосферного повітря вугільним пилом, який має наступні характеристики [3]:

Місце і спосіб відбору проби – збагачувальна фабрика. Проба відібрана перед бункером циклона.

Умови у газоході перед циклоном: $t_r = 60-250^\circ\text{C}$; $z = 1-30 \text{ г/м}$; $f = 200 - 280 \text{ г/м}^3$.

Склад газу, % (об.): RO_2 - 4; H_2O - 20; O_2 - 16; N_2 - 60. Дисперсійний склад вугільного пилу наведено в табл. 1.5:

Таблиця 1.5 – Дисперсійний склад вугільного пилу.

мкм	50	100	200	400	630
g, % (мас.)	82	68	48	32	8

Механічні властивості:

$$\rho_{\tau} = 970 \text{ кг/м}^3; \rho_y = 900 \text{ кг/м}^3; \rho_{\text{нв}} = 695 \text{ кг/м}^3; a_g = 44^\circ; P = 50 \text{ Па}.$$

Хімічний склад вугільного пилу наведений у табл. 1.6.

Таблиця 1.5 – Хімічний склад вугільного пилу

Компоненти	п.п.п.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	RO
Вміст, % (мас.)	71	17,2	7,4	1,1	1,9

Таблиця 1.6 Рівноважна вологість пилу (p_p при різній оптичній вологості повітря ($p_{\text{опт}}$

$\varphi_{\text{опт}}, \%$	10	20	40	60	80	95
$\varphi_{\text{розр.}}, \%$	0,4	0,7	1,4	2,1	3,1	4,7

Основною фізичною характеристикою мілко дисперсних часток у вигляді аерозолів є показник заломлення. Аналіз даних по хімічному складу атмосферних аерозолів показує, що неможливо запропонувати універсальну модель комплексного показника заломлення аерозолів. Однак, можливі наближення.

Один з варіантів моделі можна отримати в припущенні ідеальної механічної перемішуваності всіх хімічних сполук в кожній аерозольній частці, якщо відомі показники заломлення всіх складових частки. В твердих та краплинних аерозольних частках присутні потужні смуги поглинання аерозольною речовиною у діапазоні довжин хвиль 3, 6, 7, 9, 2 і 11,5 мкм що дозволяє проводити аналіз її кількісних та якісних характеристик по відносним коефіцієнтам пропускання.

Висновки до розділу 1

Розглянуто склад атмосферного повітря і проведено класифікацію його забруднювачів із урахуванням їх токсичності, потенційної небезпеки, поширеності та джерел емісії.

Під час санітарної оцінки повітряного середовища використовують стандарти якості атмосферного повітря та види гранично допустимих концентрацій на базі яких здійснюються всі заходи по збереженню чистоти навколишнього середовища. Розглянуто методики організації спостережень за рівнем забруднення атмосфери. При визначенні приземної концентрації домішки в атмосфері відбір проб і вимірювання концентрації домішки проводяться на висоті 1,5 ... 3,5 м від поверхні землі.

Охарактеризовано фізико-хімічні властивості зважених у повітрі часток у формі аерозолів як конденсаційних систем, які складаються з дисперсних аерозольних частинок (твердих або рідких) і газового дисперсійного середовища. Щільність твердих частинок - маса одиниці об'єму (в кг/м або в м/см) – характеризує швидкість осадження аерозольних часток при знепилюванні. Дисперсний склад зважених у повітрі часток можна представити у вигляді утримання за кількістю або за масою частинок різних фракцій. Фракцією називають відносну частку частинок, розміри яких знаходяться в певному інтервалі значень.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ЗВАЖЕНИХ ЧАСТОК АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

В даний час існує широкий спектр методів та засобів контролю зважених у повітрі часток. Універсального способу контролю, що дозволяє одночасно контролювати у повітрі усі компоненти дисперсної фази, не існує. Вибір адекватного способу контролю зважених у повітрі часток проводиться в залежності від наявного агрегатного стану речовини, а також її фізико-хімічними властивостями.

2.1. Акустичний метод вимірювання зважених часток в атмосферному повітрі

Акустичний метод визначення концентрації аерозолів заснований на вимірюванні зміни параметрів акустичного поля при наявності частинок в просторі між джерелом і приймачем звуку. Втрати ультразвукової енергії, обумовлені впливом змулених твердих частинок, залежать від ряду фізичних параметрів: радіуса частинок r , їхньої густини ρ і концентрації C , коефіцієнта пружності β_r газового середовища, у якому змунені частки пилу, густини середовища ρ_r і в'язкості η_r , швидкості c і частоти ω ультразвуку у пило-газовому середовищі [19].

Для кількісної оцінки зазначених втрат вводять коефіцієнт додаткового поглинання ультразвуку χ , який для малих концентрацій пилу C дорівнює:

$$\chi = \chi_r + \chi_p = C\xi \int_0^\infty \frac{1}{r} n(r) dr + C\xi \int_0^\infty r^3 n(r) dr \quad (2.1)$$

де $n(r)$ – густина масового розподілу частинок по розмірам;

χ_r – характеризує втрати ультразвукової енергії в акустичному тракті за рахунок тертя, що виникає при переміщенні частинок щодо середовища при:

$$\omega \gg \frac{2\eta_r}{r^2 \rho_r} \quad (2.2)$$

χ_p – характеризує розсіювання ультразвукової енергії частинками.

Вимірювання коефіцієнту додаткового поглинання χ дає можливість визначити концентрацію частинок пилу.

При цьому доцільно визначати χ однією і тією ж акустичною системою в чистому і запиленому повітрі, а потім знаходити різницю отриманих значень:

$$\chi = \chi_2 - \chi_1 = \frac{\left[\ln \left(\frac{P_0}{P_2} \right) - \ln \left(\frac{P_0}{P_1} \right) \right]}{l} \quad (2.3)$$

де χ_1 і χ_2 – коефіцієнти поглинання, що вимірюються однією і тією ж акустичною системою у запиленому і чистому повітрі відповідно;

P_0 – амплітуда акустичного тиску, що збуджується випромінювачем;

P_1 і P_2 – амплітуда акустичного тиску, що реєструється приймачем для запиленого і чистого повітря відповідно;

l – акустична довжина шляху від випромінювача до приймача.

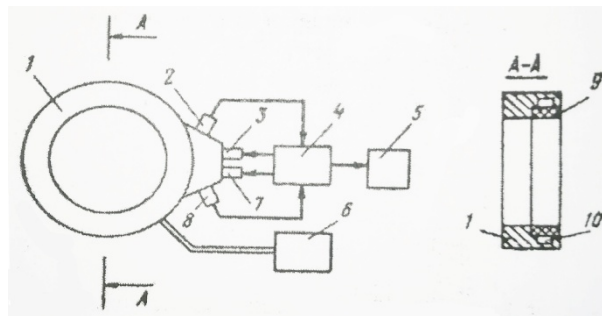


Рис. 2.1 – Схема акустичного пиломіру: 1 - вимірювальна кільцева камера; 2,8 - приймачі ультразвуку; 3,7 випромінювачі ультразвуку; 4 - блок порівняння; 5 - реєструючий прилад; 6 насос; 9 - фільтруюча перегородка; 10 - компенсаційна кільцева камера [16].

Одним із варіантів реалізації акустичного методу може бути пиломір, первинний вимірювальний перетворювач якого виконаний у вигляді кільцевої камери 1 з фільтруючою перегородкою 9. Остання перекриває

доступ частинок пилу в компенсаційну камеру 10. Кільцева камера 1 вводить в газохід так, щоб робоча порожнина її була перпендикулярна пило-газовому потоку.

При включенні насосу 6 компенсаційна камера через фільтруючу перегородку 9 заповнюється очищеним повітрям. Випромінювачі 3 і 7 одночасно посилають імпульси ультразвуку в камеру 10 і порожнину газоходу. Від випромінювача 3 ультразвук направляється в середину камери 10 і багаторазово відбившись від її стінок попадає на приймач 2. Від випромінювача 7 ультразвук направляється на внутрішню поверхню газоходу і після багаторазового відбиття попадає на приймач 8.

Так як ультразвук неодноразово проходить поперечний переріз пило-газового потоку в різних напрямках, то приймач ультразвуку 8 реєструє деяке усереднене значення ступеня загасання ультразвуку в газоході і компенсаційній камері, заповненій очищеним повітрям, судять про концентрацію пилу в потоці.

На результати вимірювання концентрації пилу акустичним методом впливають зміни швидкості і температури пило-газового потоку, тиск в газоході, вологість, температура і дисперсний склад пилу.

2.2. Метод абсорбційної фотометрії

В основу абсорбційного методу аналізу покладено закон Бугера-Бера. Враховується пропускання і поглинання світлової енергії. Пропускання T – це відношення інтенсивності потоку світлової енергії I , яке проходить через проміжок речовини що досліджується (рис. 2.2), пропорційно інтенсивності падаючого потоку світлової енергії I_0 [18]:

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.4)$$

Поглинання або оптична щільність D – це величина, що дорівнює:

$$D = \lg\left(\frac{1}{T}\right) = \lg\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2.5)$$

Відповідно закону Бугера-Ламберта-Бера при опроміненні середовища монохроматичним випромінюванням з довжиною хвилі λ , поглинання випромінювання D_λ пропорційно концентрації поглинаючої речовини в середовищі C (моль/г) і товщині поглинаючого шару L :

$$D_\lambda = a_\lambda CL \quad (2.6)$$

де a_λ – коефіцієнт поглинання, який є константою і характеризує поглинаючі властивості речовини при даній довжині хвилі λ .

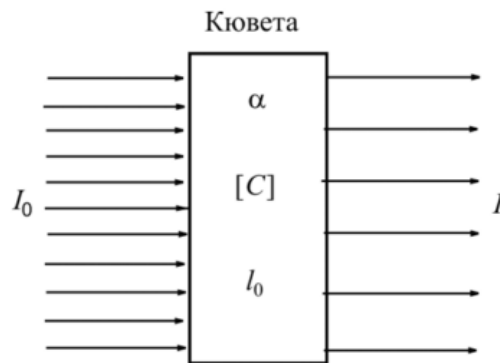


Рисунок 2.2 – Проходження світлового потоку через зразок із досліджуваною речовиною [18].

Якщо концентрація часток в середовищі C виражена в молях на літр, то коефіцієнт поглинання a_λ прийнято називати молярним коефіцієнтом поглинання і позначати його як ε_λ .

Закон Бугера-Ламберта-Бера можна записати в інших формах:

$$\lg\left(\frac{I_0}{I}\right) = \varepsilon_\lambda L \quad (2.8)$$

або

$$I = I_0 \exp(-\varepsilon_\lambda L) \quad (2.9)$$

Найважливішим показником при використанні абсорбційних вимірників є адитивність величини D_λ яка дозволяє при дослідженні середовищ, що представляють суміш хімічно реагуючих між собою компонентів, записати:

$$\lg\left(\frac{I_0}{I}\right) = \sum_{i=1}^n \lg\left(\frac{I_0}{I_i}\right) = \sum_{i=1}^n D_{\lambda i} \quad (2.7)$$

де I_i – інтенсивність світлового потоку, що пройшов через середовище i -го компонента суміші;

$D_{\lambda i}$ – величина оптичної щільності i -го компонента середовища.

Величина пропускання T зазвичай вимірюється у відсотках і змінюється в діапазоні від 0 до 100 %. Оптична щільність D оцінюється у Белах. Чутливість і похибка фотометричного аналізу багато в чому залежать від правильного (оптимального) вибору довжини хвилі, на якій здійснюються виміри, від спектру поглинання досліджуваної речовини в середовищі, спектру поглинання застосовуваних реактивів і спектру поглинання стандартних калібрувальних середовищ.

2.3. Принципи методики малокутового розсіювання в контролі дисперсних показників часток атмосферного повітря

У процесі контролю дисперсних показників зважених у повітрі часток методом малокутового розсіювання застосовують лазерну дифракцію світла на сукупності часток що знаходяться у пробі. Основним принципом методу є реєстрація інтерфераційної картини що утворюється під час розсіювання лазерного випромінювання частками (рис. 2.3). Згідно теорії світлорозсіювання, частинки, що мають менші розміри – відхиляють лазерне випромінювання на більший кут ніж частки більшого розміру. В даному випадку вважається що аналізовані частки мають сферичну форму.

Після вимірювання показників дифракції, за допомогою ЕОМ, визначаються дисперсійні характеристики частинок відповідно до їх розмірів методом найменший квадратів. У результаті отримують об'ємне або рахункове розподілення частинок відповідно до їх розмірів. Вважається, що кожна частинка є сферою та знаходиться її еквівалентний діаметр. Кількість часток певного діаметру відповідає об'ємній кількості часток.

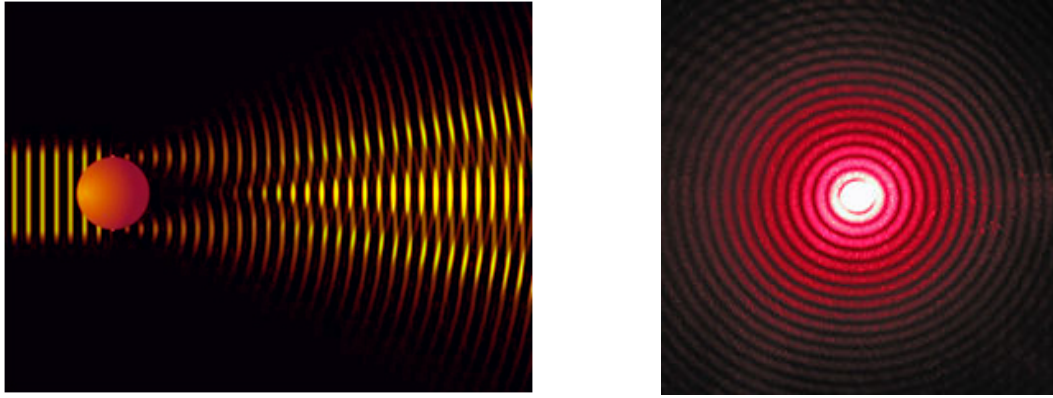


Рис. 2.3 – Формування інтерфераційної картини лазерного випромінювання при освітленні диспергованих часток атмосферного повітря.

Якщо частки у досліджуваній пробі є несферичними, використовують їх розподілення відповідно до найбільшого розмірного параметру, та усереднюють дані вважаючи максимальний розмірний параметр частинки відповідає її середньому діаметру, так як даний оптичний метод використовує у своїй математичній моделі визначення характеристики сферичних часток за розмірами. Оптична схема приладу для вимірювання спектрів розсіювання диспергованих часток у в атмосферному повітрі показано на рис.2.4.

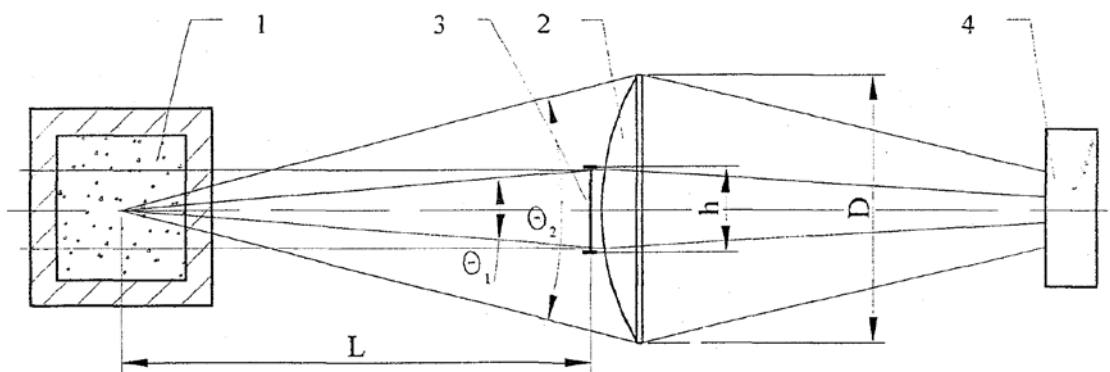


Рис. 2.4 – Хід променів у вимірювальному плечі спектрофотометру при вимірюванні спектрів малокутового розсіювання – вид зверху. 1 – досліджувана газова суміш в кюветі, 2 – фокусуюча лінза, 3 – екран, 4 – фотоприймач [43].

В результаті дослідження залежності інтенсивності розсіяного

випромінювання від кута (індикатриси розсіювання) визначають розподіл частинок за розмірами. Потім вирішується відповідна зворотна задача знаходження середнього діаметру сфери зважених у повітрі часток.

Вимірювання проводять при фіксованій довжині хвилі. Метод володіє похибкою, що виникає при поглинанні частками лазерного випромінювання. Тому даний метод потребує ретельного підбору довжини хвилі λ лазерного випромінювання, для можливості визначення дисперсних показників твердої компоненти повітря що складається із різних за природою часток.

2.4. Залежність спектру розсіяного випромінювання від розмірних параметрів часток атмосферного повітря

Розміри диспергованих частинок в атмосферному повітрі можуть знаходитися у досить широких межах – від одиниць нанометрів, до декількох мікрометрів (мікроорганізми та їх скупчення). У випадку визначення розмірних параметрів зважених у повітрі часток можна застосувати теорію Мі. Основними положеннями цієї теорії є те, що провівши розклад розсіювання світла що відбувається на частках розміром d їх розміри можна співставити із довжиною хвилі λ падаючого світла. У випадку, коли $d \ll \lambda$ потрібно перейти від положень теорії Мі до закономірностей релеевського розсіювання.

Можна виділити два найбільш значущих випадки розсіювання світла, рис. 2.5. Релеевське або симетричне (випадок А) розсіяння відбувається при дії випромінювання на частки із відносних діаметром близько 0,1 від довжини хвилі λ . Розсіяння Мі має місце при відповідності розміру частинки довжині хвилі світла що на неї падає (випадок Б). Таким чином, виникає явище при якому частки різних розмірів розсіюють нерівномірно світло. У випадку частинок великих розмірів, має місце тип світлорозсіяння, при якому вперед – за напрямом потоку розсіюється більше світла, ніж у зворотному напрямку.

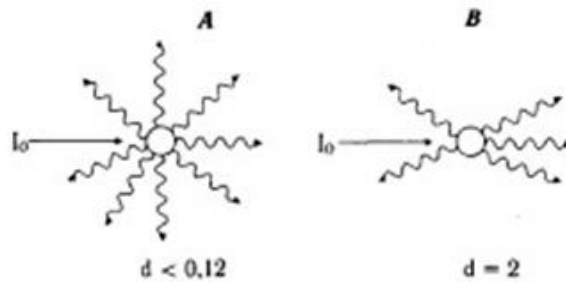


Рис. 2.5 – Розсіювання світла при різних співвідношеннях розміру часток і довжини хвилі електромагнітного випромінювання λ [21].

В результаті виміру світлового потоку розсіяного об'єктом під різними кутами можна побудувати індикатрису розсіювання – криву, що графічно відображає відмінність в інтенсивності світла, розсіяного в різних напрямках (пряма задача). Приклади індикатрис розсіювання для частинок різних розмірів наведено на рис. 2.6.

Отримання інформації про розміри і концентрації частинок за даними індикатрис розсіювання – зворотна задача методу мало кутового розсіювання. Точне рішення зворотнього завдання є складною процедурою. Апаратура для проведення вимірювань дисперсних показників часток методом мало кутового розсіювання повинна включати спектрофотометричний детектор, для вимірювання інтенсивності розсіяного світла під кутом до напрямку випромінювання лазера [22].

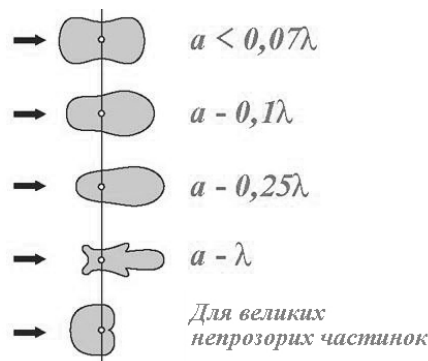


Рис. 2.6 – Індикатриси розсіювання світла для частинок різних розмірів.

Для повного з'ясування передбачливих можливостей спектру малокутового розсіювання необхідно розглянути модель, що дозволяє

проводити розрахунок цих спектрів в заданих діапазонах кутів і довжин хвиль при варіюванні параметрів скупчення частинок що розсіюють.

Відповідно до моделі теорії Мі та наближення однократного розсіювання, форма частинок розглядається як сферична. Положення теорії Мі справджується лише при малій концентрації частинок що розсіюють, або в повітряному проміжку малої товщини. Можна вважати, що інтенсивність розсіювання світлового потоку I у повітряному середовищі при відсутності поляризації падаючого випромінювання можна знайти за виразом [36]:

$$I = \frac{1}{2k^2r^2} [|S_1|^2 + |S_2|^2] \quad (2.8)$$

де k – хвильовий вектор середовищі, що оточує частинку яка розсіює випромінювання;

r – середня відстань від зваженої у повітрі частки до фотодетектору вимірювача.

В даному виразі S_1 та S_2 є амплітудними функціями, що характеризують розсіювання. Вони відповідають поляризації розсіяного випромінювання в площині розсіювання та у площині що є до неї перпендикулярною [24, 36].

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.9)$$

де λ – довжина лазерного випромінювання.

Довжина хвилі випромінювання що поширюється у середовищі із зваженими у ньому частками, пов'язана з довжиною хвилі випромінювання у вакуумі λ_0 співвідношенням $\lambda = \frac{\lambda_0}{n_r}$, де n_r – відносний показник заломлення середовища.

За допомогою виразу 2.8 можна визначити дозволяє виразити диференціальний переріз розсіювання частинок через значення параметрів S_1 та S_2 . Він визначається, як потужність, розсіяна в одиницю тілесного кута по напрямку Ω . Параметр напрямку Ω задається 2-ма кутами –кутом азимуту φ

та кутом розсіювання θ . Підставивши відповідні значення із виразів 2.8 та 2.9, диференціальний переріз розсіювання на ансамблі зважених у прозорому середовищі часток, буде мати вигляд:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 n_f^2} \cdot [|S_1|^2 + |S_2|^2] \quad (2.10)$$

Далі знаходимо амплітудні функції розсіювання S_1 та S_2 , що відповідають поляризації розсіяного випромінювання в площині розсіювання. Для сферичної частинки радіусу r , вирази для знаходження амплітудних коефіцієнтів розсіювання матимуть вигляд [10]:

$$S_1(\lambda, \theta, r) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2i+1}{i(i+1)} (a_i \pi_i + b_i \tau_i) \quad (2.11)$$

$$S_2(\lambda, \theta, r) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2i+1}{i(i+1)} (a_i \tau_i + b_i \pi_i) \quad (2.12)$$

де a_i та b_i – безрозмірні коефіцієнти Мі;

π_i та τ_i – значення кутових коефіцієнтів розсіювання для методу.

Тепер потрібно знайти відносний показник заломлення середовища, у якому проводяться виміри. Для цього необхідно використати відношення:

$$m = \frac{n_{\text{част.}}}{n_{\text{серед.}}} \quad (2.13)$$

де $n_{\text{част.}}$ та $n_{\text{серед.}}$ – відповідні показники заломлення сферичної частинки на якій спостерігається явище розсіювання та середовища знаходження диспергованої частинки [28].

Значення кутових коефіцієнтів розсіювання, які необхідні для обрахунку амплітудних коефіцієнтів розсіювання S_1 та S_2 можна знайти із виразів рекурсії:

$$\pi_i = \frac{2n-1}{n-1} \cdot \cos\theta \cdot \pi_{n-1} - \frac{n}{n-2} \pi_{n-2} \quad (2.14)$$

$$\tau_i = n \cos \theta \cdot \pi_n - (n + 1) \pi_{n-1}$$

Використовуючи вирази (2.8-2.14) можна врахувати не тільки розсіювання, але і поглинання світла мікрочастинками

2.5. Контроль дисперсних показників часток атмосферного повітря методом лазерної інтерферометрії

Для середовищ із високим ступенем оптичної однорідності в якості внутрішнього стандарту може бути використана інтенсивність розсіювання світла на коливаннях кристалічної решітки – розсіювання Мандельштама-Бріллюена (РМБ). У цьому методі в якості інформативної характеристики оптичної однорідності використовується відношення інтенсивностей релеєвського розсіювання.

Для середовищ з більш значними оптичними неоднорідностями, такими, наприклад, як зовнішні частинки у суміші газів із низької молекулярною масою (нормальний склад атмосферного повітря), у якості інформативної оптичної характеристики можна використати характеристики розсіювання.

Для розсіювання в поглинаючому середовищі слід урахувувати поглинання як падаючого, так і розсіяного випромінювання. Для малокутового розсіювання, збуджуваного паралельним пучком, інтенсивність розсіювання буде становити [28, 39]:

$$I \sim T * [|S_1|^2 + |S_2|^2] \quad (2.15)$$

де T – коефіцієнт пропускання середовища.

Для системи, що складається з N розсіюючих частинок, невпорядковано розподілених у просторі, результуюча інтенсивність поля є сумою інтенсивності полів, розсіяних окремими частинками $f(a)$. Імовірність того, що частинка має радіус від a до $a + da$ виражається [28]:

$$W(a, a + da) = f(a) * da \quad (2.16)$$

При розрахунках передбачається гаусове розподілення частинок за радіусом:

$$f(a) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{(a - \bar{a})^2}{D} \right] da \quad (2.17)$$

де \bar{a} – середній радіус частинки що розсіює випромінювання;

D – дисперсія випромінювання.

Інтенсивність розсіювання частками під малими кутами θ ($\cos \theta \approx 1$) можна знайти, якщо розсіюючі частинки знаходяться в проточній кюветі і освітлені монохроматичним світловим випромінюванням:

$$\overline{|S(\lambda, \theta)|^2} = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N f(a_i) * [|S_1(\lambda, \theta, a_i)|^2 + |S_2(\lambda, \theta, a_i)|] \quad (2.18)$$

де N – загальне число зважених частинок;

a_i – радіус i -тої частинки;

$f(a_i)$ – функція розподілу частинок за радіусами.

Для забезпечення точності та достовірності вимірів дисперсних показників часток в атмосферному повітрі враховують поглинання випромінювання що падає на частки у прозорому середовищі. Також необхідно врахувати показники випромінювання що розсіюється прозорим середовищем. Для цього необхідно знати довжину оптичного шляху l проточної кювети, через яку проходить повітря із зваженими в ньому частками.

2.6. Обробка результатів вимірювань спектрів малокутового розсіювання

Численне та об'ємне розподілення розмірних часток у повітрі по розмірам (розмірні спектри) визначають за допомогою кутових вимірювачів

дисперсності використовуючи наступні методи обробки вимірювальних даних:

Метод візуалізації динаміки руху дисперсної фази за допомогою дифракції лазерного світла показує частинки дисперсної фази у робочому полі зору у вигляді характерних кілець. Візуально в досліджуваному об'ємі розчину можна спостерігати казуальну якісну картину, яка відображає: 1) направлення руху дисперсної фази, 2) відносну швидкість переміщення, 3) набір видів дифракційних структур, що розрізняються за кількістю відрізняються за кількістю кілець дифракції та максимального радіусу останнього видимого кільця. Результати не залежали від об'єму використовуваної кювети (з довжинами оптичного шляху від 1 до 10 см) [11].

Метод лазерної інтерферометрії дозволяє отримати картину розсіяного світла що проходить через дисперсну фазу із зваженими у ній частками. Оптична картина формується у площині фокусу перетворювальної лінзи Фур'є. Далі отримана картина дифракційних кілець реєструється фотодетектором. Для зменшення похибок методу необхідно дотримання границь оптичного збільшення інтерференційної картини, що сформована у площині вимірювача. Отримана інтенсивність дифракційної картини перетворюється у сигнали вимірювальної інформації та обробляється відповідними математичними методами на ЕОМ.

Аналізуючи спектрм мало кутового розсіювання зважених у дисперсній фазі часток можна отримати як якісну так і кількісну інформацію. Можна, зокрема, спостерігати кінетику процесів модифікації часток у повітряній дисперсній фазі. Реєструючи спектри розсіювання і поглинання з певним часовим інтервалом, можна відслідковувати зміну співвідношення між утвореними і зваженими частинками, а також об'єднання частинок у більші утворення. Шляхом *спільної обробки спектрів поглинання і розсіяння об'ємної концентрацій часток у воді* може бути знайдений наведений коефіцієнт розсіювання R в заданому інтервалі кутів.

При вимірюванні спектру екстинкції за схемою рис. 3.4 відповідно до закону Бугера –Ламберта [1]:

$$I = I_0 \exp(-kl), \quad (2.19)$$

$$T_{\text{проп.}} = \frac{I}{I_0} = \exp(-kl) \quad (2.20)$$

де l - довжина оптичного шляху кювети.

При вимірюванні спектру малокутового розсіювання за схемою рис.3.4:

$$I = I_{\text{диф.}} \exp(-kl) + I_0 R l \exp(-kl) \quad (2.21)$$

Для наведеного коефіцієнта розсіювання:

$$R(\lambda) = \frac{1}{l} \frac{I_{\text{диф.}}(\lambda)}{I_0(\lambda)} [T_{\text{роз.}}(\lambda) - T_{\text{проп.}}(\lambda)] \quad (2.22)$$

Відношення $\frac{I_{\text{диф.}}(\lambda)}{I_0(\lambda)}$ залежить тільки від параметрів екрану, точніше визначається часткою випромінювання, дифрагovanого на цьому екрані. При вимірах малокутового розсіювання, R не залежить від особливостей приладу, а визначається тільки розсіюючими властивостями досліджуваного зразка [10, 11, 43].

Концентрації розсіюючих і поглинаючих частинок можуть бути визначені по градувальним залежностям, побудованим за спектрами пропускання і розсіювання зразків порівняння. При аналізі систем, що містить розсіюючі і поглинаючі частинки кількох сортів, можуть бути використані методи багатовимірного калібрування.

Висновки до розділу 2

Проведено огляд методів вимірювання важени часток в атмосферному повітрі. Розглянуто особливості методики мало кутового розсіювання, що проводиться з метою визначення концентрації, розміру і форми зважених у повітрі часток. Проаналізовано залежність спектру розсіяного випромінювання від розмірних параметрів часток атмосферного повітря. Розглянуто методи обробка результатів вимірювань спектрів малокутового розсіювання

РОЗДІЛ 3. КОНТРОЛЬ ДИСПЕРСНОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВИМІРЮВАЛЬНИМ МАКЕТОМ НА БАЗІ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

Аналіз складу повітря при допомозі БПЛА має багато переваг порівняно із стаціонарним лабораторним аналізом. Це дозволяє економити засоби та час доставки отриманих результатів у лабораторію дослідження. При проведенні аналізу на місці, як правило, не потрібні висококваліфіковані виконавці, так як застосовуються більш прості засоби аналізу. Найголовніше достоїнство такого дослідження полягає в тому, що об'єкт аналізу який досліджується дистанційним засобом об'єктивного контролю, до якого можна віднести БПЛА з вимірювальним модулем, важко дослідити в стаціонарній лабораторії. Така ситуація може мати місце коли якісні або кількісні показники досліджуваного об'єкту мають властивість змінюватися у часі та просторі. Це особливо актуально для контролю дисперсних показників атмосферного повітря, так як еромобільна платформа дозволяє проводити аналіз атмосферного повітря у широкому інтервалі висотних діапазонів без прив'язки до конкретного місця проведення вимірів.

Аналіз складу повітря БПЛА проводиться фактично в режимі реального часу. Це дає можливість негайно приступити до дослідження отриманих даних та визначення необхідних показників, не очікуючи завершення досліджень в лабораторії. Очевидно, що роль стаціонарної лабораторії досліджень аналізу складу повітря повинна зменшуватися, а значення мобільних комплексів об'єктивного контролю, до яких можна віднести вимірювальні системи на базі БПЛА, буд збільшуватися із часом. Слід зазначити, що досягнення аналітичного приладобудування, аналітичної хімії та суміжних галузей надають можливості для аналізу створюють усі можливості для контролю якісних та кількісних показників повітря за допомогою дрона.

Такі літальні апарати оснащені всім необхідним обладнанням для проведення високоточного аналізу складу повітря. Сучасні сенсори, які

можуть бути використані в якості мобільних модулів, розташованих на БПЛА, мають наступні переваги:

- зменшення затрат на обслуговування;
- надійність і об'єктивність контролю досліджуваного об'єкту;
- універсальність застосування;
- зручна візуалізація даних;
- ожливість передачі даних штатними засобами телеметрії аеромобільної платформи у режимі реального часу;
- використання у поєднанні з іншими сенсорами;
- легка вага і компактні розміри;
- висока чутливість сенсорів;
- можливість проводити діагностику декількох показників одночасно.

Тому, для оцінки стану забруднення, прогнозування і контролю якісного і кількісного складу атмосферного повітря необхідно проводити комплексні заходи, складовою частиною яких екологічний моніторинг за допомогою аеромобільних вимірювальних платформ.

3.1. Вибір аеромобільної платформи вимірювального комплексу

Основними характеристиками, яким повинна відповідати аеромобільна платформа для контролю дисперсних характеристик атмосферного повітря є час польоту та грузоподібність.

Данні параметри впливають на ціну апарату, тому такі квадрокоптери використовуються лише в конкретних областях для виконання конкретних завдань. Для виконання завдання моніторингу атмосферного повітря, аеромобільна платформа повинна відповідати наступним вимогам:

1. Можливість транспортувати вагу вимірювального модулю що складає 3750 г та габаритні розміри 150x200x350 мм (Ш x Д x В) під час слідування маршрутом на відстань не менше 5 км;

2. Можливість змінювати висотний ешелон в діапазоні висот від 2 до 500 м. Забезпечення даних вимог дозволяє контролювати стан приземного повітря в заданому районі та дисперсність повітряних мас в прилягаючому до земної поверхні повітрі;

3. Час польоту не менше 10 хв. зі швидкістю до 10 м/с у всьому діапазоні висот.

Для того, щоб мультикоптер відповідав необхідним вимогам для аеромобільної платформи потрібно забезпечити:

- вантажопідйомність від 5 кг;
- систему кріплення вимірювального засобу та амортизації;
- збільшення кількості двигунів для забезпечення більшої стійкості та потужності мультикоптера;
- відповідні розміри для забезпечення універсальності;
- підвищені вимоги до якості та потужності акумулятора для збільшення тривалості польоту;
- оснащення парашутною системою для м'якої підсадки при виникненні надзвичайних ситуацій (відказів двигунів, низького заряду акумулятора).

Підвищена вантажопідйомність БПЛА пов'язана із технічними складнощами забезпечення безпеки та тривалості польоту:

- обмеження по вазі – зі збільшенням масогабаритних характеристик модулю безпілотного літального апарату знижується його маневренність та тривалість польоту, що створює необхідність використовувати більші легкі, але міцні матеріали;
- -час польоту напряму залежить від маси модулів що розміщені на безпілотному літальному апараті та заряду акумуляторної системи;
- парусність аеромобільної платформи, тобто здатність протистояти повітряному потоку і зберігати рівномірність польоту, залежить від габаритних показників модулів що розміщені на дроні;

- залежність від погодних умов – мультикоптери не здатні справлятися з осадками (виникає небезпека короткого замикання струмопровідних ділянок конструкції) та сильним вітром, а понижені температури різко знижують заряд акумулятора;
- тривалість польоту – чим більша вага навісних модулів розміщена на аеромобільній платформі, тим швидше мультикоптер вичерпує заряд акумуляторної батареї;
- безпека – складність у відслідковуванні місцезнаходження апарату підвищує можливість його втрати під час відказу навігаційної системи та енергонезалежного датчику місцезнаходження;
- надійність – маршрут аеромобільної платформи потрібно складати із врахуванням наявності скупчень людей, розташування споруд та рельєфу підстилаючої поверхні;
- територіальне обмеження - місця польотів обмежено приватними територіями, на яких БПЛА може бути заглушений або пошкоджений;

Таким чином, для вибору аеромобільної платформи вимірювального макету для контролю дисперсних показників атмосферного повітря, потрібно забезпечити відповідність вищевказаним вимогам.

3.2. Технічні характеристики аеромобільних платформ високої вантажопідйомності

На даний час, для забезпечення різноманітних завдань контролю територій в промисловості, сільському господарстві та екологічному моніторингу багатьма компаніями виробляються безпілотні літальні апарати що володіють підвищеними показниками вантажопідйомності та тривалості часу польоту.

Станом на кінець 2019 року, найбільш розповсюдженими мультикоптерами підвищеної вантажопідйомності вважаються моделі

компаній DJI, Freefly, Vulcan та Versadrones. Наведемо основні конструктивні особливості даних моделей.

1. *DJI Matrice 600 Pro* [24] - апарат, що сумісний з навісними модулями. Випускається з 6 акумуляторами, які забезпечують 16 хвилин польоту при максимальній вазі 15 кг. Апарат здатний розвивати швидкість до 65 км/год. Непоганим бонусом є складаний корпус.



Рис. 3.1 – Зовнішній вигляд аеромобільної платформи DJI Matrice 600 Pro

Дрон M600 Pro сумісний з лінійкою камер DJI Zenmuse і з програмним і апаратним забезпеченням сторонніх виробників. M600 Pro здатний слідувати за маршрутом на відстань до 5 км від пульта управління. Всі 6 акумуляторів об'єднані однією платою розподілу живлення і керуються єдиною інтелектуальною системою. Дрон може знаходитися в повітрі при відмові одного із акумуляторів. Технічні характеристики аеромобільної платформи DJI Matrice 600 Pro наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Основні технічні характеристики аеромобільної платформи DJI Matrice 600 Pro.

Діагональна база шасі	1133 мм
Габарити літального апарату	1668 x 1518 x 727 мм (Пропелери, кріплення рамки і модуль GPS розгорнуті. З шасі);

Продовження таблиці 3.1.

Вага (із шістьма батареями TB47S)	9,5 кг
Вага (з шістьма батареями TB48S)	10 кг
Макс. вантажопідйомність	10.5 кг
Точність зависання (в режимі P-Mode, з GPS)	Вертикальна: ± 0.5 м, Горизонтальна: ± 1.5 м
Макс. кутова швидкість	При нахилі: $300^\circ / \text{с}$, при повороті: $150^\circ / \text{с}$
Макс. допустима швидкість вітру	8 м/с
Макс. швидкість підйому	5 м/с
Макс. швидкість зниження	3 м/с
Макс. швидкість	65 км/год (Без вітру)
Макс. висота польоту над рівнем моря	2500 м
Час зависання (з шістьма батареями TB47S)	Без завантаження: 32 хв, з завантаженням 6 кг: 16 хв
польотний контролер	A3 Pro

Польотний контролер A3 Pro оснащений блоками індивідуальної навігаційної системи (ІНС) і глобальної навігаційної системи (ГНС), що дозволяють йому зчитувати і порівнювати польотні дані в режимі реального часу. Система амортизації допомагає зменшити вібрації аеромобільної платформи при роботі вимірювальних приладів що розміщені БПЛА.

Польотний контролер може автоматично керувати параметрами польоту при різній вазі додаткового обладнання що розміщено на аеромобільній платформі. Гексакоптер M600 Pro оснащено системою позиціонування D-RTK GNSS що дозволяє забезпечити ефективну точність керування БПЛА.

Основна сфера застосування – моніторинг територій, професійна відеоз'йомка, геодезичні роботи, створення ортофотопланів, інспектування об'єктів.

2. *Freefly ALTA 8* [25]– БПЛА мультироторного типу що володіє гарною маневреністю та скомпоновано на базі складної рами з вуглепластику. Апарат з вантажопідйомністю до 8 кг здатний пролітати близько 2,5 км. У комплектацію входить спеціальний контейнер для перевезення. Навісні модулі на коптер кріпляться знизу і зверху. Дрон керується польотним контролером SYNAPSE і сумісний з камерами RED або ARRI.



Рис. 3.2 – Зовнішній вигляд аеромобільної платформи Freefly ALTA 8.

БПЛА ALTA 8 використовує високошвидкісну реєстрацію даних через карту micro SD. Цей журнал польотів дає пілотам доступ до широкого кола корисних даних. Двигуни аеромобільної платформи забезпечують баланс між робочими характеристиками та ефективністю та є стандартом для важких мультироторних коптерів. Літальний апарат ALTA важить всього 6,5 кг та здатний піднімати вантаж до 18 кг. Технічні характеристики мультикоптеру Freefly ALTA 8 наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Технічні характеристики мультикоптеру Freefly ALTA 8

Діагональна база шасі	1325 мм
Складений діаметр	660 мм
Кількість двигунів	8
Тип двигуна	Direct Drive 3-Phase PMAC Outrunner
Марка та модель двигуна	Freefly F45
Максимальна безперервна вихідна потужність двигуна	350 Вт

Продовження таблиці 3.2

Максимальна миттєва пікова потужність двигуна	950 Вт
Макс. Об / хв (плоский рейтинг)	6300 RPM
Еквівалент Kv	384
Електронний контролер швидкості	Freefly Silent-Drive Sine Wave ESC
Пропелери	
Модель гвинта	Freefly ALTA
Матеріал гвинта	Вуглецеве волокно з ядром бальзи
Тип гвинта	(4) CW та (4) CCW гвинт 18 x 6
Акумулятор	
Номінальна напруга акумулятора	6S/22,2V
Максимальний розмір акумулятора	240 x 180 x 80 mm
Максимальна кількість акумуляторів	2 Акумуляторні батареї (паралельні)
Мінімальна кількість акумуляторів	2 Акумуляторні батареї (паралельні)
Роз'єми акумулятора	2x EC5 (паралельні)
Необхідний мінімальний заряд акумулятора	250A/500A
Габарити	
Вага максимального вантажу	18,1 кг
Максимальне корисне навантаження	9,1 кг
Типови порожня вага	6,2 кг

Freefly ALTA 8 використовує управління синусоїдальним приводом із запатентованими алгоритмами управління. Приводи двигуна налаштовані відповідно до F45 і оптимізовані для швидкості, надійності роботи. Двигуни постійно контролюються контролером SYNAPSE у різних параметрах роботи та оптимізують свій ресурс відповідно до польотного маршруту.

БПЛА ALTA може утримувати позицію навіть у складних погодних умовах використовуючи технології GPS та поєднуючи ці дані з IMU та барометром. Для промислових завдань це дає можливість виконувати складні траєкторії польоту, зберігаючи низьку залежність від пілота.

3. *Vulcan UAV Black Widow* [26] (рис. 3.3) коптер з гнучкою модульною системою, яка дозволяє встановлювати шасі і регулювати акумуляторний відсік. Випускається в комплектації ОКТО (X8) і гекса (X6). Дана модель має силіконову антивібраційну систему, яка дозволяє швидко встановити корисний вантаж і шасі. Посадочні шасі висотою мають висоту 178 мм або 304 мм для використання з професійними кріпленнями для навісних модулів.



Рис. 3.3 – Зовнішній вигляд БПЛА Vulcan UAV Black Widow.

Vulcan UAV Black Widow застосовується у завданнях аерофотозйомки, для геодезичних вимірів та моніторингу територій. Коптер має модульну конструкцію і та зручний у налаштуванні до польоту. БПЛА має ефективну антивібраційну систему із демпферами для інтеграції навісних модулів. Мультироторний коптер випускається у вигляді 2 моделей: X8 та X6.

Таблиця 3.3. Технічні характеристики БПЛА Vulcan UAV Black Widow

Діагональна база шасі	1220 мм
Складений діаметр	440 мм
Кількість двигунів	8
Тип двигуна	4014 3-Phase PMAC

Продовження таблиці 3.3

Еквівалент Kv	380
Максимальна безперервна вихідна потужність двигуна	430 Вт
Максимальна миттєва пікова потужність двигуна	1020 Вт
Необхідний мінімальний заряд акумулятора	250A/500A
Вага максимального вантажу	17,4 кг
Максимальне корисне навантаження	14,2 кг
Типовиа порожня вага	7,1 кг

Vulcan UAV Black Widow ідеально підходить для завдань середнього підйому, де важливі високий рівень надійності та чіткий огляд датчика. Коаксіальна конфігурація X8 забезпечує хороші характеристики на вітрі, а також велику кількість підйому для перевезення середніх і важких вантажів, в той же час пропонуючи хорошу стійкість від полумок. Рама міцна і включає розширений інструмент.

Присутній швидкий механізм складання для зручності транспортування та зберігання. Доступні стандартні рейки для кріплення корисного вантажу, а також опція для широко розставлених висувних шасі, що надає багато місця для централізованого монтажу карданних підвісів.

4. *Versadrones Heavy Lift Octocopter (HLO)* [27] - професійний коптер, здатний перевозити до 12 кг і підніматися на висоту до 2000 м (рис. 3.4.). У спокійну погоду розвиває швидкість до 70 км / ч. Li-Po акумулятори мають підвищену ємність. Технічні характеристики мультикоптеру наведено в таблиці 3.4.

Особливості цього дрона:

- можливість роздільного управління дроном і камерою;
- знімні промені, для зручності транспортування;
- 8 безколекторних двигунів з 15 "карбовоними пропелерами;

- використання Li-Po акумуляторів великої ємності для збільшення часу польоту;
- рама зібрана з вуглецевого волокна що робить її легкою і одночасно міцною;
- Можливість онлайн трансляції відео в форматі HD;



Рис. 3.4 – Зовнішній вигляд мультикоптеру Versadrones (HLO)

Таблиця 3.3. Технічні характеристики мультикоптеру Versadrones (HLO)

Габаритні розміри(мм)	1200 x 1200 x 400
Складений діаметр	1040 мм
Кількість двигунів	8
Макс. швидкість	70 км/год (Без вітру)
Макс. висота польоту над рівнем моря	2000 м
Номінальна напруга акумулятора	6S/18,9 V
Максимальна кількість акумуляторів	2 Акумуляторні батареї (паралельні)
Макс. швидкість підйому	6 м/с
Макс. швидкість зниження	3 м/с
Вага максимального вантажу	24,2 кг
Максимальне корисне навантаження	11,8 кг
Типови порожня вага	6,8 кг

Літальний апарат Versadrones (HLO) має можливість компонування з контролером GPS, що забезпечує автоматичне повернення в точку старту,

онлайн трансляцію і рух по заданому маршруту. Системе підвісів дозволяє прикріплювати широку номенклатуру навісних модулів.

3.3. Конструктивні особливості вибраної аеромобільної бази вимірювального макету

У якості аеромобільної бази для контролю диспергованих часток атмосферного повітря застосовано октокоптер великої вантажопідйомності «FalcoR18» [28] (рис. 3.5). Льотно-технічні характеристики мультикоптеру FalcoR18 наведено у таблиці 3.5.



Рис. 3.5 – Зовнішній вигляд мультикоптеру «FalcoR18»

Таблиця 3.5. Технічні характеристики мультикоптеру «FalcoR18».

Параметр	Значення
Крейсерська швидкість, м/с	8 м/с
Тип АКБ	2x (LI-ION) 6s24v (32500mah)
Час польоту, хв	18 хв
Довжина маршруту за виліт, км	10 км
Рекомендований радіус дії, км	8 км
Максимальна вертикальна швидкість, м/с	2 м/с
Допустиме вітрове навантаження в польоті, м/с	До 10 м/с

Продовження таблиці 3.5.

Параметр	Значення
Температурний діапазон, град	-15 до +40
Температура акумулятора перед стартом, град	+20С
Вага максимального вантажу	16,4 кг
Максимальне корисне навантаження	10,2 кг
Типовиа порожня вага	6,4 кг

У якості джерела живлення БПЛА використовується пара з двох акумуляторів літій іонного типу (рис. 3.6). Технічні характеристики джерела живлення БПЛА.

- тип акумуляторної батареї: Літій-Іонна;
- номінальна напруга: 22,2В;
- максимальна напруга у повністю зарядженому стані: 25,2В;
- мінімально допустима напруга при розряджанні: 19,8В;
- напруга у режимі зберігання: 22 - 22,8В;
- тип силового роз'єму: XT90;
- тип балансного роз'єму: JST ХН;
- вага: 2500±50 г.



Рис. 3.5 – Зовнішній вигляд акумуляторних батарей БПЛА FalcoR18.

При проведенні підготовки до польоту необхідно забезпечити БПЛА достатньою кількістю пар заряджених акумуляторних батарей. Під час

планування польотного завдання стає відомими кількість та час виконання польотів. Зарядка батарей виконується за допомогою зарядного пристрою.

Тип батареї Li-Io - літій-іонний тип електрохімічного процесу, який визначає номінальні напруги заряду/розряду:

- повний заряд 4,2В на кожному банку,
- номінальна напруга 3,7В,
- номінально припустима напруга розряду - 3,3В.

Заряд понад 4,2В та розряд нижче 3,4В на комірку призводять до зменшення ресурсу батареї. Конфігурація батареї 6S - 6 акумуляторних банок, що зібрані послідовно. Це означає, що усі номінальні напруги мають бути помножені на кількість послідовно з'єднаних комірок:

- повний заряд $4,2В \cdot 6 = 25,2В$,
- мінімальний розряд $3,3В \cdot 6 = 19,8В$.

Струм в міліамперах має дорівнювати ємності батареї в міліампер/годинах. Загальна ємність акумуляторної батареї при температурі +20С складає 32500mah.

Наземна система управління (НСУ). До складу наземного пункту керування БпАК входять:

- пульт дистанційного управління БпЛА;
- антенний блок телеметрії та управління та відеоантена
- комплект кабелів FTDI та відеоантени
- наземна станція;
- ноутбук;

Пульт дистанційного управління призначений для виконання старту/посадки авіаплатформи та для контролю бпла під час польоту та для активування та задіяння системи скиду. Технічні характеристики пульта дистанційного керування БпЛА:

- назва моделі: Taranis X9D Plus 2019;
- кількість каналів: 24 канали;

- діапазон робочої напруги: постійний струм 6,5 ~ 8,4 В;
- система OpenTX.

Перед використанням пульта ДУ потрібно перевірити рівень заряду батареї. Використання пульта ДУ з рівнем заряду АКБ менше 7В забороняється. Далі ми проведемо огляд перемикачів і важелів пульта дистанційного управління, які потрібні при експлуатації БПЛА «R18 Falco» (рис. 3.6)

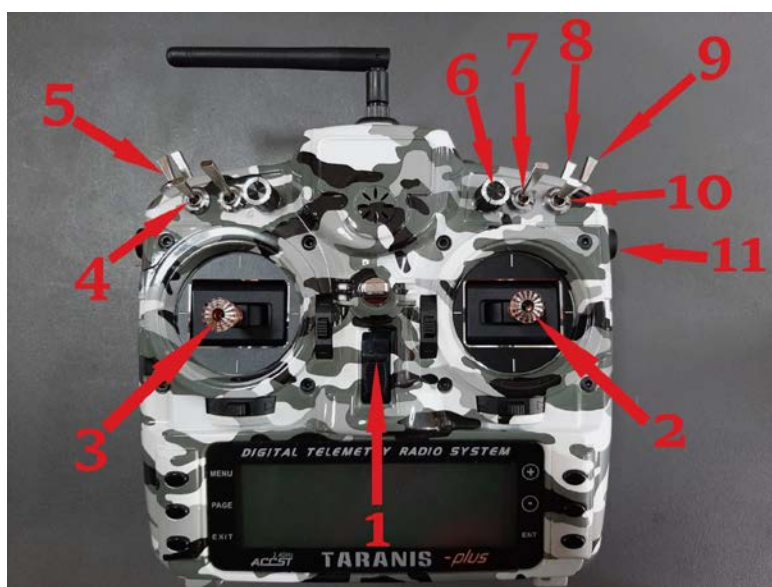


Рис. 3.6 – Зовнішній вигляд контролера керування БПЛА «R18 Falco»:

1. кнопка вкл/викл пульта ДУ; 2 – правий важіль: *тангаж, крен*; 3 – лівий важіль: *газ, ристання*; 4 – польотні режими: *від себе, режим STABILIZE, посередині, режим LOITER, на себе, режим ALT HOLD*; 5 – пріоритетний тумблер: *від себе, нейтральне значення, посередині, режим AUTO, на себе, режим RTL*; 6 – шестипозиційний перемикач каналів телеметрій між RFD та LIZA; 7 – відеопередача: *від себе, відео вимкнено, на себе, відео включено*; 8 – команда скиду цільового навантаження; 9 – активізатор скиду: *від себе, запобіжник, посередині, активізація серви №1, на себе, активізація серви №2*; 10 – OSD: *від себе, пусте поле, посередині, половина інформації, на себе, повна інформація*; 11 – PITCH стабілізованого підвісу.

Система автоматичного управління БПЛА забезпечує автоматичний (автономний), ручний та комбінований режими управління літальним

апаратом та його обладнанням. Вона забезпечує траєкторне управління та режим зависання (зі стабілізацією висоти та утриманням позиції) БпЛА; автоматичну стабілізацію висоти, швидкості та кутових параметрів. Зовнішній вигляд

Присутня функція автоматичного повернення БпЛА до місця старту чи в будь-яку іншу задану точку посадки; а також можливість зміни траєкторії польоту БпЛА відповідно до напрямку об'єктиву камери спостереження або напрямку на об'єкт, заданим на електронній карті місцевості. При втраті зв'язку між НПУ та БпЛА через відмови у каналах зв'язку або наявності пасивних чи активних завад передбачена реалізація автономного (аварійного) режиму роботи САУ, який забезпечує або подальше продовження виконання завдання, або автоматичне повернення БпЛА до визначеного місця.

БпЛА «R18 Falco» оснащено засобами телеметрії і управління RFD та LIZA. Зовнішній вигляд засобів телеметрії та керування наведено на рис. 3.7.

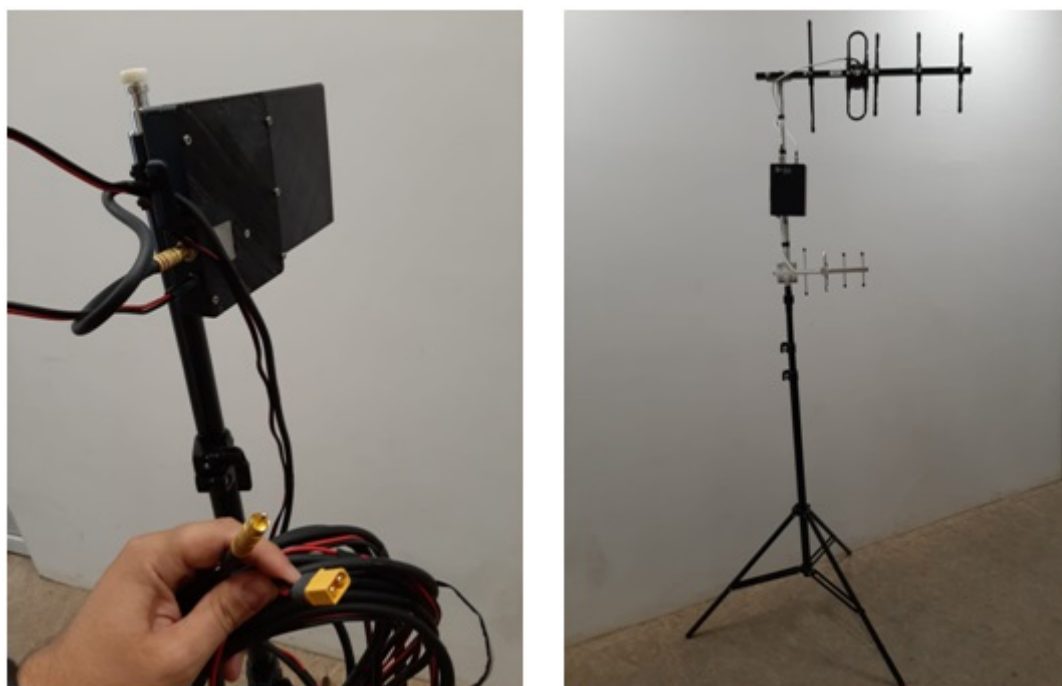


Рис. 3.7 - Антенний блок телеметрії і управління та відео антена мультикоптерної аеромобільної платформи «R18 Falco»

Блок керування та телеметрії (БКТТ) являє собою приймально-передавальний вузол. Оснащений системою корекції польотного маршруту в

режимі реального часу. Він має автономне джерело живлення. При підключенні кабелю FTDI – блок автоматично запускається. В момент підключення повинні бути під'єднані антени телеметрії та управління, для уникнення пошкодження прийомо-передавальних пристроїв під час роботи без пасивного навантаження.

БКТТ під'єднується за допомогою кабелю FTDI до ноутбуку, на якому за допомогою програми Mission Planner відображаються льотні показники авіаплатформи. Характеристики наземного блоку прийому-передачі телеметричного сигналу:

- тип антени: хвильовий канал;
- центральна частота: 22 МГц;

Відео антена оснащена системою подавлення шумів в режимі реального часу. Вона, в свою чергу, підключається до наземної станції задля відображення відеокартинки з бортового підвісу. Основні технічні характеристики блоку телеметрії показано в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6. Технічні характеристики антени прийому телеметрії аеромобільної платформи «R18 Falco».

Параметр	Значення
Контроль живлення	від наземної станції
Робоча частота	22...24 МГц;
Потужність передавача	від 136 дБм;
Вихідна потужність	160 дБм
Живлення, номінальна напруга:	24 В

Перед кожним польотом БпЛА в складі БпАК «R18 Falco» необхідно виконати наступні процедури з технічного обслуговування:

- перевірка роботи системи стабілізації контролеру автопілоту;
- огляд цілісності та чистоти контактів електричних роз'ємів авіаплатформи та акумуляторної батареї;
- огляд на предмет відсутності тріщин та інших пошкоджень механізмів збросу цільового навантаження;

- перевірка рухомості та відсутності підклинювання сервомеханізмів, тяг та важелів приводів керування скиду та якщо потрібно виконання змазки штоку;
- перевірка двигунів на наявність стороннього сміття чи пилю та відсутність підклинювання та сторонніх шумів при обертанні;
- перевірка рухомості приводів гіростабілізації підвісу;
- перевірка цілісності дротів силового та балансиного роз'ємів акумуляторних батарей;
- перевірка коректної роботи магнітного компасу контролера автопілоту;
- перевірка цілісності та працездатності пульта ручного керування та достатнього рівня зарядки інтегрованого в нього акумулятора;
- перевірка цілісності та працездатності відтворювача та реєстратора відеоінформації;
- перевірка цілісності та працездатності кабелю живлення та інтерфейсного кабелю FTDI;
- проведення передстартової перевірки згідно керівництву з льотної експлуатації.

Технічне обслуговування під час передпольотної підготовки проводиться з метою підготовки частин БпАК, які мають знос під час експлуатації, підготовка до роботи в нормальному режимі, а також для виявлення дефектів, які могли виникнути під час зберігання та транспортування БпАК.

3.4. Система управління, контролю та екологічного моніторингу аеромобільної платформи «FalcoR18»

Аеромобільна платформа «FalcoR18» оснащена пультом управління і контролю (ПУ), що являє собою портативний комп'ютер (переносний

планшет) з протиударним та вологозахисним корпусом, спеціальним графічним інтерфейсом, дає змогу відображати інформацію екологічного моніторингу та телеметрію, перевіряти працездатність БПЛА та його обладнання, здійснювати планування польотного завдання (рис. 3.8) [29].



Рис. 3.8 – Графічний інтерфейс системи контролю, управління і моніторингу Mission Planner БПЛА «R18 Falco»: 1 – кнопка «льотні дані»; 2 – кнопка «планувальник маршруту»; 3 – індикатор швидкості та напрямку вітру; 4 – меню вибору відповідного СОМ-порту та швидкості підключення; 5 – кнопка з'єднання/від'єднання програми з БПЛА; 6 – поточні геокоординати БПЛА; 7 – кількість супутників та показник Hdop GPS; 8 – відображення параметрів з авіаплатформи; 9 – меню; 10 – графічна параметрична інформація з борту, авіагоризонт; 11 – поточне місцезнаходження коптера на карті.

На моніторі ПУ відображається карта місцевості з відміткою поточного положення БПЛА, пілотажно-навігаційна інформація, дані про стан бортового обладнання, зони огляду камер, а також відеозображення ділянки підстилаючої поверхні, яка спостерігається. Експлуатаційний контроль бортового обладнання БПЛА здійснюється з пульта управління БпАК за допомогою штатного програмного забезпечення.

Програмне забезпечення працює в комплексі з бортовою системою автоматичного управління БпЛА та забезпечує:

- оперативне планування польотного завдання та ведення його в пам'ять автопілоту;
- передпольотну перевірку (установку первинного зв'язку; автоматичне тестування);
- корегування параметрів автопілоту.

Візуалізація даних навігаційної системи проходить в режимі реального часу (рис. 3.9) [30] у вигляді траєкторії руху і відображення параметрів руху на панелі приладів у вигляді числової інформації, та включає:

- відображення телеметричної інформації;
- дистанційне управління БпЛА;
- роботу з приймачем супутникової системи навігації;
- відображення відеоінформації у реальному часі;
- аналіз польотних даних;



Рис. 3.9 – Графічна параметрична інформація аеромобільної платформи «R18 Falco».

Основні елементи навігаційної системи БПЛА «R18 Falco» (рис. 3.9):

1. Азимут польоту за магнітним компасом – відображає курс, за яким у даний час спрямований БПЛА від 0 – 360 градусів за магнітним компасом, де: «0» та «360»- це напрямок на північ, «90»- напрямок на схід, «180»- напрямок на південь, «270»- напрямок на захід.
2. Кут крену – відображає кут нахилу у повздовжньому напрямку.
3. Рівень сигналу телеметрії – відображає у процентному відношенні стійкість сигналу радіообміну між БПЛА та наземним обладнанням.
4. Дійсна висота БПЛА відносно точки зльоту.
5. Наявний режим автопілоту та дистанція до наступної точки в метрах.
6. Дані напруги АКБ, значення струму та процентне відношення заряду.
7. Якість сигналу телеметрії (RFD).
8. Кут тангажу, відображає кут нахилу у поперечному напрямку.
9. Повітряна швидкість БПЛА.

Для виконання з'єднання з БПЛА на екрані головного інтерфейсу в вибирають потрібний COM-port, частотний діапазон та швидкість з'єднання. Вкладка «Mission Planner» є основною частиною головного інтерфейсу програми що являє собою сукупність графічної параметричної інформації про стан маршруту БПЛА. За допомогою інструментальних панелей вкладки «Mission Planner» можна вносити зміни у маршрут, відсилати команди на зміну швидкості, висоту польоту.

Навігаційна система аеромобільної платформи дозволяє забезпечення роботи БпАК у режимі системи моніторингу дисперсних показників повітря у вибраному висотному діапазоні при слідуванні за маршрутом.

БПЛА «R18 Falco» оснащено зовнішніми вузлами підвіски, що надають можливість використовувати кріплення вимірювача дисперсних показників атмосферного повітря у контейнерному вигляді. При значенні корисного навантаження вимірювального модулю аеромобільної системи для контролю дисперсних показників повітря до 4 кг, БПЛА «R18 Falco» дозволяє знаходитися у повітрі на протязі до 20 хв, та проходити маршрут до 10 км.

3.5. Конструктивні особливості вимірювального модулю контролю показників дисперсності атмосферного повітря

Вимірювальний засіб придатний для визначення розмірів диспергованих частинок атмосферного повітря на базі аеромобільного макету включає вимірювач дисперсності що містить у якості джерела випромінювання лазер із довжиною хвилі 656 нм.

У якості фотодетектору було застосовано первинний вимірювальний перетворювач фотодіодний ПЗЗ детектор TAOS TSL1406R що реєструє випромінювання розсіяне у потоці атмосферного повітря яке проходить через проточну кювету у металевому корпусі.

Сформоване в площині детектору зображення формує індикатрису кутового розсіювання. Значення ослаблення випромінювання використовується для розрахунку дисперсних характеристик об'єкта. Оптична схема лазерного вимірювача методом мало кутового розсіювання показана на рис 3.10 [31].

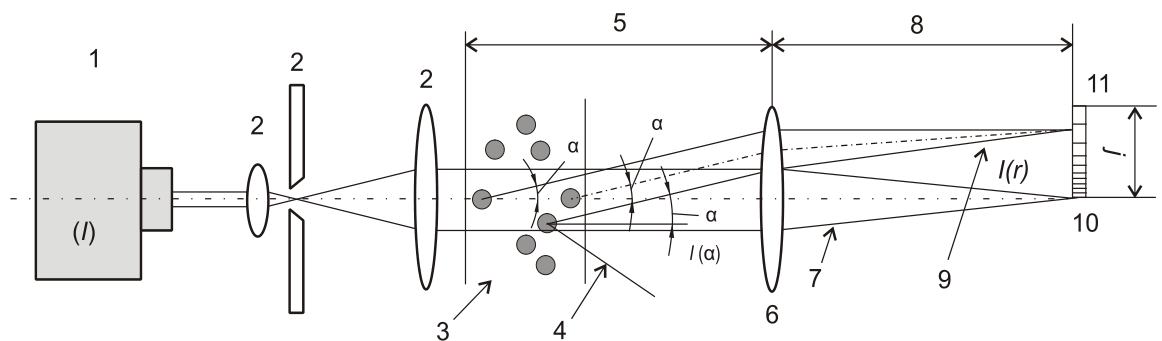


Рис. 3.10 – Схема оптичної частини вимірювача дисперсних характеристик часток атмосферного повітря проточним методом. 1 – джерело монохроматичного випромінювання; 2 – формуюча лінза, 3 – дисперсні частки повітря, 4 – світло що розсіюється на частках, 5 – лінійний діапазон оптичної системи, 6 – лінза із перетворенням фур'є, 7 – сформовані перетворювальною системою промені світла, 8 – фокусна перетворювальної системи 6, 9 – промені світла розсіяні частками, 10 – фотодіодний детектор TAOS TSL1406R, 11 – робоче пооле фотодіодного детектору [2].

У процесі роботи вимірювального засобу джерело когерентного випромінювання (1) висвітлює дисперсні частки повітря (3). Розсіяне випромінювання відхиляється на кут який є пропорційним розмірному діаметру частки, вважаючи що її форма є сферичною. Опрична система (2, 6) формує світловий потік на площині розташування напівпровідникового детектору (10).

Вимірювач дисперсних показників середовища на базі аеромобільної платформи «R18 Falco», що показано на рис. 3.11 застосовується для вимірювання наступних показників зважених у повітрі диспергованих часток: відносний середній діаметр (D_{avr}) частки, рахункова концентрація або кількість часток у одиниці об'єму (N_{sm}^3), середня об'ємна концентрації (W%) часток що присутні у потоці повітря при проходженні через кюветне відділення вимірювача.



Рис. 3.11. Зовнішній вигляд вимірювача дисперсності часток атмосферного повітря

Дана модифікація вимірювального засобу оснащена проточною кюветою для забору повітря у процесі руху аеромобільної платформи (рис. 3.12). На вході вимірювальної кювети розміщено роторний вентилятор

SUNON із габаритними розмірами 25x25x10 мм для забору потоку атмосферного повітря та термокондуктомтеричний витратомір GFS131 фірми GaMicos. Для забезпечення точності та достовірності вимірів характеристик витрат повітряної суміші, що пройшла через вимірювальну кювету застосовано температурний датчик та вологомір серії SHT. Забір повітря може відбуватися без врахування напрямку руху аеромобільної платформи.

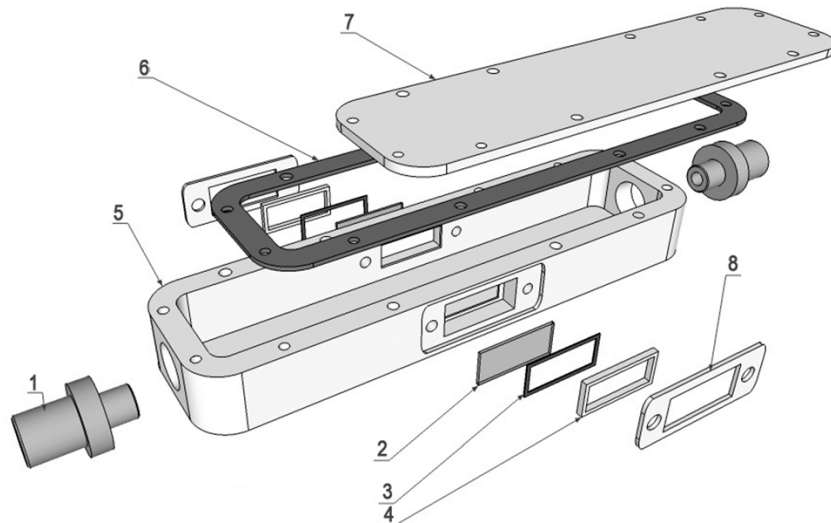


Рис. 3.12 – Креслення кюветного відділення вимірювального макету (проточна кювета): 1 – редуктор; 2 – оптичне вікно; 3 – (кварцове скло); 4 – ущільнення гумове; 5 – ущільнення фторопластове; 6 – корпус кювети; 7 – ущільнення гумової кришки кювети; 8 – кришка кювети; 9 – притискувач.

Розглянуте схемне рішення не потребує додаткових пристроїв для створення потоку повітря через вимірювальну кювету та дозволяє проводити дисперсний аналіза атмосферного повітря при швидкостях аеромобільної платформи у діапазоні 0,5-10 м/с. Отримані у процесі польоту аеромобільної платформи дані про дисперсні показники атмосферного повітря записуються на постійний запам'ятовувальний пристрій та можуть бути передані на станцію контролю польоту за допомогою телеметрії для подальшої обробки на ЕОМ.

У процесі слідування аеромобільної платформи за маршрутом, відповідно до даних навігаційної системи ArGIS, відбувається запис швидкості та висоти польоту безпілотного літального апарату FalcoR18, а

також проводиться вимірювання тиску, температури та вологості атмосферного повітря на маршруті. Отримані дані використовуються для корекції похибок вимірювань. За допомогою вбудованого витратоміра

Прилад живиться від джерела постійного струму 12В. Збирання отриманих даних проводиться виводом потокової інформації у форматі *.csv. Після первинної обробки отриманих даних за допомогою пакетів обробки даних подібних до Microsoft Excel, можна отримати інформацію про дисперсні характеристики повітря на маршруті слідування аеромобільної платформи.

3.6. Вибір витратоміра вимірювального макету

Для забезпечення контролю об'єму повітря що пройшло через кювету вимірювача дисперсних характеристик повітря було застосовано прецизійний витратомір GFS131 (рис. 3.13), технічні характеристики якого наведено у таблиці 3.7 [33].



Рис. 3.13 – Зовнішній вигляд витратоміра серії GFS131.

Особливості витратоміра серії GFS131.

- будована технологія сенсорного чіпа MEMS;
- висока точність, швидкий відгук, хороша повторюваність;
- виявлення мікро потоку точно;
- можливість калібрування відносно показів встроєних датчиків температури та вологості.

Таблиця 3.7. Технічні характеристики витратоміра серії GFS131.

Модель	GFS131			
Лінійний діапазон вимірювань	100, 150, 200, 300SLM			
	Мін.	Типове	Макс.	Параметр
В натуральну величину на виході	4,34	4,50	4,66	V
Нульовий вихід	0,45	0,5	0,55	V
Вихідний опір	-	1000	-	Ω
Робоча напруга	4,95	5,0	14,0	V
Робочий струм	-	25	-	MA
Точність	-	$\pm 2,5$	± 4	%; F
Точність повторюваності	-	$\pm 0,5$	± 1	%; F
Вихід (дрейф нуля)	-	0,12	-	%/°C
Сигнал шум/опір	-	10	-	MB (Vrms)
Матеріал корпусу	-	120	-	Поліамід (Pa)/60SLM
Споживана потужність	-	125	-	MW/5V
Робочий тиск	-	-	100	КПа
Час відгуку	-	50	-	мс
Робоча температура	-25		65	°C
Температура зберігання.	-40		90	°C

Датчик GFS131 використовує термодинамічний принцип для визначення швидкості потоку газового середовища в каналі потоку, з хорошою точністю і повторюваністю. Датчики температури та вологості SHT вбудовані у витратомір, калібруються для компенсації температурної похибки та контролю витрат із врахуванням вологості повітря. GFS131 має лінійний аналоговий вихід напруги, зручний у використанні [34].

Датчик володіє лінійним діапазоном вимірювання витрат газової суміші із низької молекулярною масою в межах 2-300SLM. Показник SLM означає «стандартний літр в хвилину». Значення SLM визначається при наступних умовах:

- температура газу 20°C;
- тиск 101,325 кПа;

- випробувальне середовище – чисте повітря.

Час відгуку датчика GFS131 може бути налаштований у межах 15-1000 мс. Температурна компенсація може виконуватися в діапазоні 0-50°C. Ефективність компенсації не може бути забезпечена за межами даного діапазону температур. Датчик під'єднано до контролеру вимірювача дисперсних показників атмосферного повітря.

Розрахунок витрат газової суміші із низької молекулярної масою датчиком GFS131 відбувається відповідно до значення сигналу $U_{\text{вих}} = 0,5 \dots 4,5$ В за параметричним рівнянням:

$$V_{\text{ф.п.}} = \frac{U_0}{U_{\text{вих.}}} \cdot N_{\text{SLM}} \cdot \tau_t \cdot \tau_w \quad (3.1)$$

де $V_{\text{ф.п.}}$ – виміряне значення витрат газової суміші, в SLM;

U_0 – нульован напруга на виході первинного перетворювача;

$U_{\text{вих.}}$ – робоча напруга, що відповідає виміряному значенню витрат;

N_{SLM} – шкала витратоміра, що складає 300 SLM;

τ_t – температурний компенсаційний коефіцієнт;

τ_w – вологість повітря, приведена до точки роси.

Наприклад: повна шкала датчика складає 300 SLM, нульова вихідна напруга датчика становить 0,5 В, повне вихідна напруга -4,5 В, а фактична вихідна напруга – 3,5 В, $\tau_t = 0,985$, $\tau_w = 0,99$ Тоді фактичний потік буде складати:

$$V_{\text{ф.п.}} = \frac{0,5}{3,5} \cdot 300 \cdot 0,985 \cdot 0,99 = 41,8 [\text{SLM}]$$

Таким чином, досягається оптимальна точність вимірів витрат газоповітряної суміші що проходить через кюветне відділення вимірювача дисперсності за одиницю часу. Мінімальним відліком, із яким працює вимірювача дисперсних показників атмосферного повітря є 1 мксек, при частоті вибірки 1 кГц. Отримане значення виміряної витрати повітря із зваженими в ньому дисперсними частками відноситься до кількості відліків вимірювача дисперсності що складає від 60 до 60 тис. за хвилину.

3.6.1. Оцінка вимірювання відносної вологості атмосферного повітря

Проведемо аналіз отриманих вбудованим датчиком вологості SHT витратоміра GFS131 приведених до стандартного методу вимірювання вологості за термодинамічною точкою роси (ТТР). Це дозволить з'ясувати, яка точність вимірювання достатня для врахування компенсаційного коефіцієнту вологості газоповітряної суміші що проходить через проточну кювету вимірювача дисперсності.

Нехай при температурі T відносна вологість повітря складає f . Тоді пружність пари e буде рівна:

$$e = fE_T. \quad (3.2)$$

Відповідно положень термодинаміки:

$$e = E_\tau \quad (3.3)$$

Таким чином можна знайти пружність насиченого газу:

$$E_\tau = fE_T. \quad (3.4)$$

Підставляючи замість пружності насичення її значення, отримаємо:

$$E_0 \exp \left[\frac{L}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{\tau} \right) \right] = fE_0 \exp \left[\frac{L}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]. \quad (3.5)$$

де E_0 – початкова пружність парогазової суміші;

T_0 – початкова температура;

k – температурний коефіцієнт;

Розв'язавши (3.5) відносно f , нехтуючи при цьому температурною залежністю L в діапазоні температур від T до τ , отримаємо:

$$\ln f = \frac{L}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{\tau} \right). \quad (3.6)$$

Розв'язуючи (3.6) відносно τ і продиференціювавши результат по f , отримаємо:

$$\frac{d\tau}{df} = \frac{\frac{k}{L} \frac{1}{f}}{\left(\frac{1}{T} - \frac{k}{L} \ln f \right)^2}. \quad (3.7)$$

Дане рівняння можна вважати чутливістю методу точки роси. Воно дозволяє визначити, яка точність вимірювання ТТР необхідна для визначення відносної вологості повітря з тою чи іншою точністю.

Нехай, наприклад, $f=60\%=0,6$ і $T=293\text{K}$. Тоді:

$$\frac{d\tau}{df} = \frac{1,91 \cdot 10^{-4} \frac{1}{0,6}}{\left(\frac{1}{293} - 1,91 \cdot 10^{-4} \ln 0,6 \right)^2} = 0,26 \quad (3.8)$$

Таким чином, при температурі 20°C і вологості близько 60% для вимірювання вологості з точністю до 1% необхідно здійснити вимірювання ТТР з похибкою, що не перевищує $0,26^\circ\text{C}$. Аналогічні обчислення при інших температурах і вологостях показані на рис. 3.14.

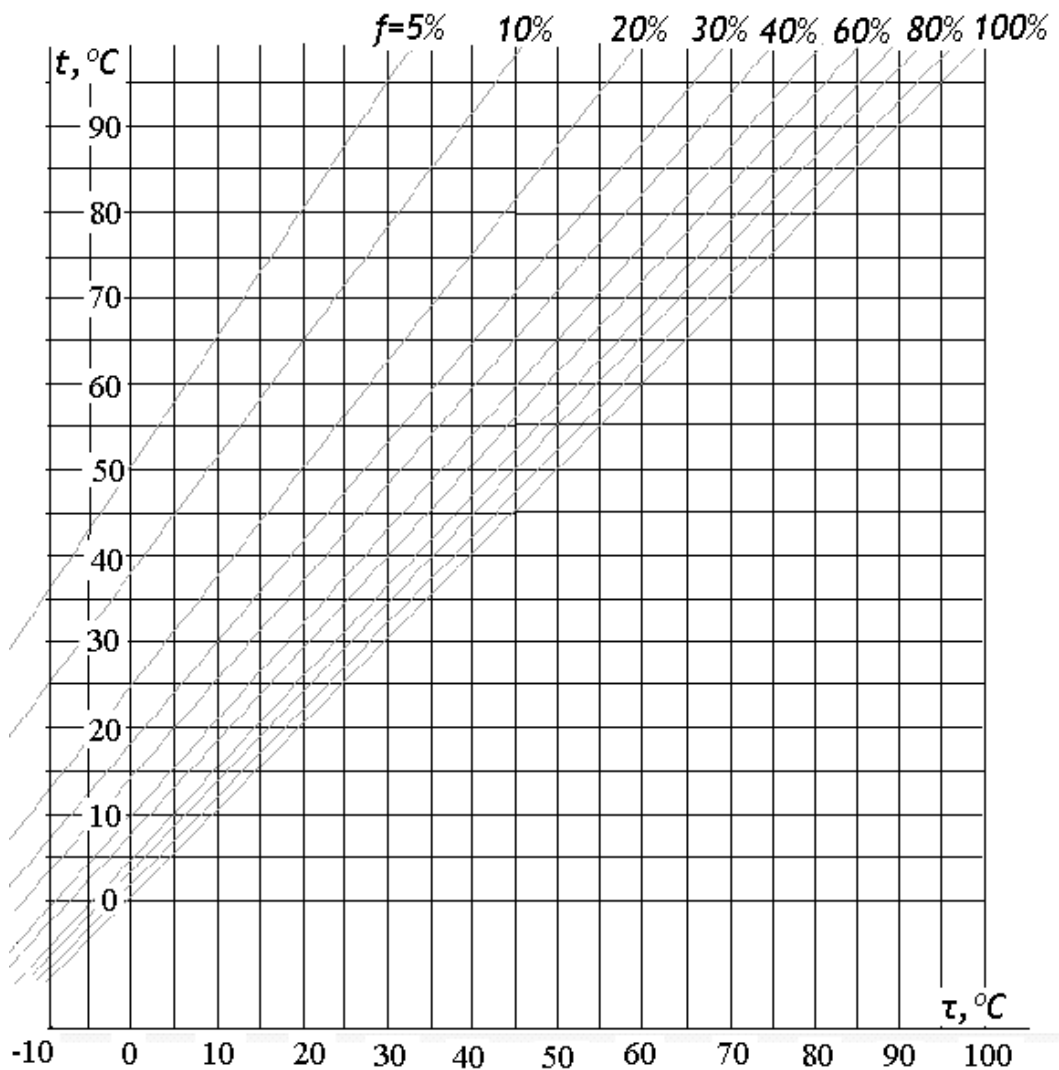


Рис. 3.14 – Смуги постійної відносної вологості повітря.

Рис. 3.14 доводить, що чутливість методу точки роси висока як при позитивних, так і при негативних температурах, і тому вимоги до точності вимірювання ТТР при низьких температурах залишаються такими ж невисокими, що і при позитивних. Вимірювання ТТР з точністю до 0,1 - 2°C практично сповна достатньо як при позитивних, так і при негативних температурах. Невисокі вимоги до точності вимірювання температури є одним з головних переваг методу, особливо якщо його порівняти з психрометричним, що є основним в геофізиці.

Розрахунок відносної вологості проводиться, якщо нам відома температура точки роси τ і температура досліджуваного газу T ($T \geq \tau$), то згідно формули (4.1.3) можна визначити його відносну вологість:

$$f = e^{\frac{L}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{\tau} \right)} \quad (3.9)$$

Для розрахунку відносної вологості газоповітряної суміші датчиком серії SHT використовують смуги постійної відносної вологості повітря, що закладені в ПЗЗ датчику у вигляді параметричних рівнянь. Таким чином, можна знайти значення відносної вологості повітря при зміні температури середовища проведення вимірів дисперсних показників атмосферного повітря. Для прикладу, візьмемо зміну температури на 10 градусів в діапазоні $T=303K, \tau=293K$.

$$\frac{k}{L} = 1,91 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1};$$

Підставивши числові значення в формулу (3.9), отримаємо:

$$f = e^{\frac{1}{1,91 \cdot 10^{-4}} \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{293} \right)} = 55$$

Аналогічно проводять розрахунки для значень температури для заданого температурного діапазону. Враховуючи що виміри дисперсних показників атмосферного повітря проводилися в температурному діапазоні (20...30)°C. Результати розрахунків приведені в таблиці 3.15.

Таблиця 3.15 – Вологість при температурі навколишнього середовища

Температура навколишнього середовища, °C	Вологість, %								
	30	35	40	45	50	55	60	65	70
30	11	13	15	17	18	20	21	23	24
29	10	12	14	16	18	19	20	22	23
28	9	11	13	15	17	18	20	21	22
27	8	10	12	14	16	17	19	20	21
26	7	9	11	13	15	16	18	19	20
25	6	9	11	12	14	15	17	18	19
24	5	8	10	11	13	14	16	17	18
23	5	7	9	10	12	14	15	16	17
22	4	6	8	10	11	13	14	15	16
21	3	5	7	9	10	12	13	14	15
20	2	4	6	8	9	11	12	13	14

Приведені дані показують, що використаний метод та засіб контролю вологості придатні для розрахунку витрат повітря при вимірі його дисперсних показників та володіють достатньою точністю результатів.

3.6.2. Оцінка теплової інерційності термодатчика витратоміра

Розділяють дві моделі теплової інерційності напівпровідникових термодатчиків:

1. Тепловиділення всередині елементу термодатчика (рис. 3.15,а);
2. Вирівнювання температури елементу термодатчика із зовнішнім (рисунок 3.15,б).

Якщо в всередині термодатчику є напівпровідниковий елемент що має масу m та теплоємність c , можна визначати його температурне зміщення. У цьому випадку отримується потужність P при досягненні температури Θ_2 :

$$P = \xi S(\Theta_2 - \Theta_1) + mc \frac{d(\Theta_2 - \Theta_1)}{dt} \quad (3.10)$$

$$\frac{\Theta_2 - \Theta_1}{P/\xi S} = \frac{1}{1 + T\rho} \quad (3.11)$$

$$T = \frac{mc}{\xi S} \quad (3.12)$$

де S – поверхня теплообміну;

ξ – коефіцієнт віддачі тепла;

T – постійна часу.

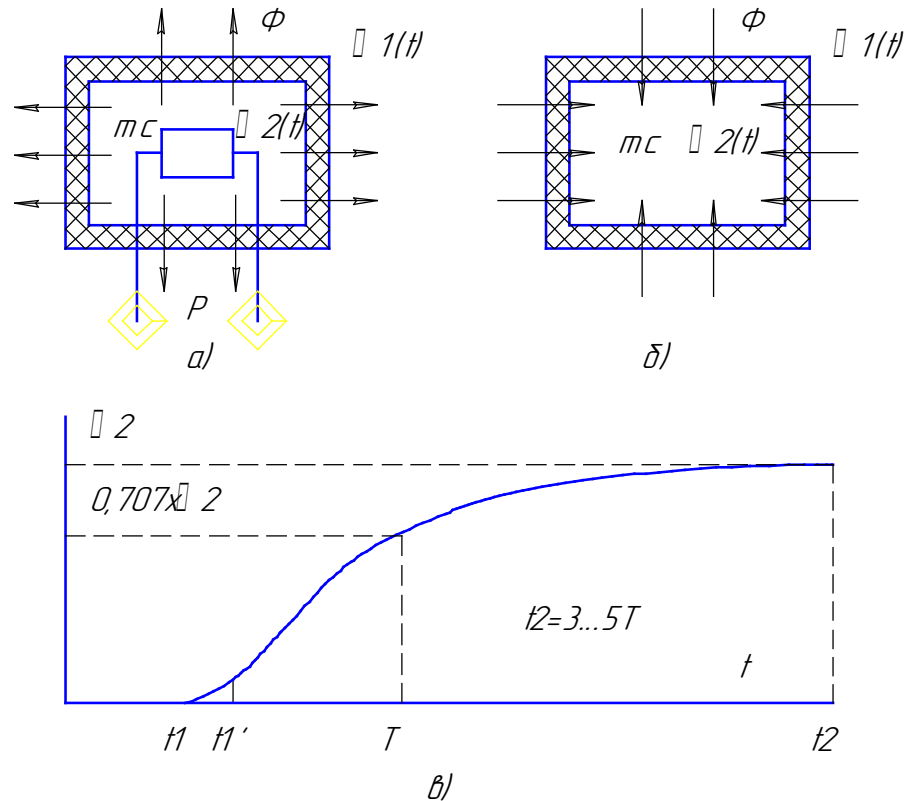


Рис. 3.15 – Динамічні властивості термодатчика SHT.

В другому випадку відбувається стрибок температури Θ_1 зовнішнього середовища в момент часу t_1 . Тоді внутрішня температура Θ_2 до неї вирівнюється:

$$\Theta_1 = \Theta_2 + \frac{mc}{\xi S} \frac{d\Theta_2}{dt} \quad (3.13)$$

$$\frac{\Theta_2}{\Theta_1} = \frac{1}{1 + T\rho} \quad (3.14)$$

У часовому проміжку від t_1 до t_2 (рис. 3.15,в) формуються температурні градієнти переходу, що відбувається за час T (постійну часу). За час T

відбувається 70% перехідного процесу. За час $3...5T$ перехідний процес вважається майже завершеним. Робоча частота термодатчика SHT складає до 10 кГц, що дозволяє формувати вимірювальну інформацію для розрахунку температурного компенсаційного коефіцієнту витратоміра та вимірювача дисперсних показників атмосферного повітря у діапазоні відліків від 60 до 60 тис. одиниць.

3.7. Обґрунтування вибору фотодетектору вимірювальної частини макету контролю дисперсності атмосферного повітря.

Вибраний у якості первинного вимірювального перетворювача вимірювача дисперсності ПЗЗ TSL1406R є набірним фотодетектором *p*-типу провідності, що представляє собою сукупність структур метал-діелектрик-напівпровідник (МДН структур), сформованих на загальній напівпровідниковій підкладці таким чином, що смужки електродів утворюють лінійну або матричну регулярну систему [1], причому відстані між сусідніми електродами настільки малі, що стає відчутним вплив один на одного внаслідок взаємного перекриття областей заряду

При використанні в якості діелектрика оксиду (наприклад, діоксиду кремнію), подібну структуру прийнято називати метал-оксид-напівпровідник (МДН-структура). МДН-структури, а саме МДН-ємності (рис. 3.16), являються основним елементом конструкції більшості сучасних інтегральних схем і планарних приладів, зокрема для ПЗЗ [2]. МДН-ємність складається з електрода, який виготовляється з металу або сильнолегованого полікремнію, діелектрика, в якості якого часто використовується оксид кремнію і напівпровідникової підкладки.

Фотодіодна лінійка TSL1406R має лінійний діапазон 400 точок на дюйм (DPI), та утворює масив сенсорів, що складається з двох блоків по 384 пікселя, кожен з власним виходом. Розділи вирівнюються щоб утворити суміжний 768×1 піксельний масив. Пристрій містить піксельну функцію

утримання даних забезпечує одночасний інтеграційний запуск і зупинку інтеграції для всіх пікселів. Діапазон пікселів становить 63,5 мкм на 55,5 мкм, міжрядковий інтервал 63,5 мкм і відстань між пікселями 8 мкм. Операція сканування спрощена внутрішньою логікою, яка вимагає тільки імпульсу послідовного входу (SI) і генератора частоти.

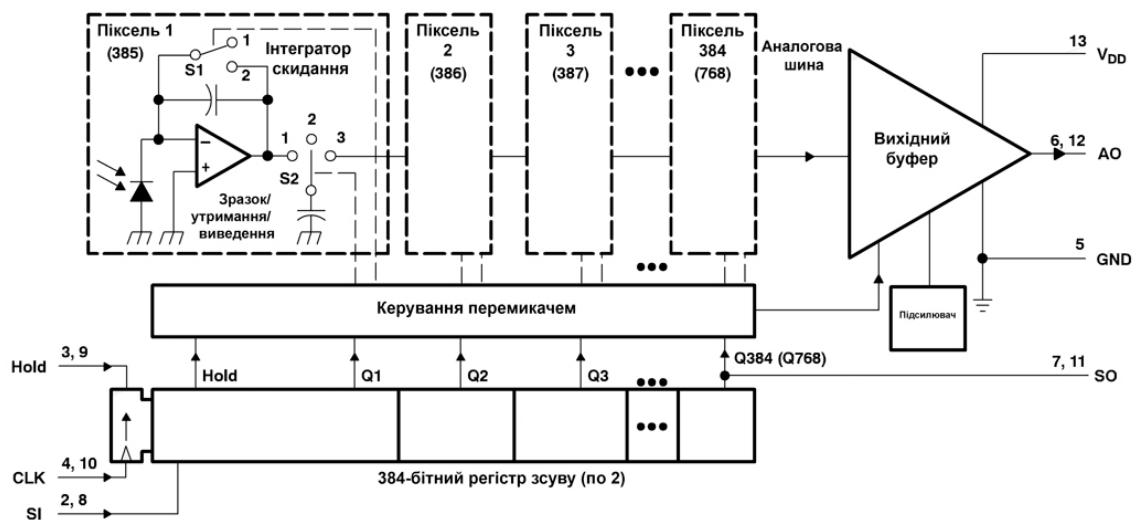


Рис.3.17 – Функціональна схема включення первинного перетворювача (фотодіодної лінійки TAOS TSL1406R) вимірювача дисперсних показників атмосферного повітря на базі аеромобільної платформи FalcoR18.

Пристрій працює від опорного джерела напруги 5В. Можна прочитати дві секції по 384 пікселя окремо або можна провести каскадне сканування, щоб забезпечити єдиний вихід для всіх 768 пікселів. TSL1406RS призначений для використання в системах технічного зору, розпізнавання зображень, позиціонування елементів зображення та оптичного кодування сигналів.

3.8. Вибір схеми включення фотодетектору вимірювача дисперсних показників повітря

Фотодіодний детектор TAOS TSL1406R складається з 768 фотодіодів, розташованими в лінійному масиві. Світлова енергія, що впливає на піксель, генерує фотострум, який потім інтегрується за допомогою схеми активної інтеграції, пов'язаної з цим пікселем.

Загальний вихід фотодетектору АО (рис 3.17) є виходом операційного типу, який не вимагає зовнішнього висувного резистора. Ця конструкція дозволяє відхилити вихідну напругу від залізниці до залізниці. При $V_{DD} = 5\text{ В}$ вихідний сигнал номінально дорівнює 0 В при відсутності входу світла, 2 В для нормального рівня білого і $4,8\text{ В}$ для рівня насиченості світла. Коли пристрій не знаходиться у вихідній фазі, АО знаходиться в високоимпедансному стані. Схема електрична принципова включення ПЗЗ лінійки показана на рис. 3.18.

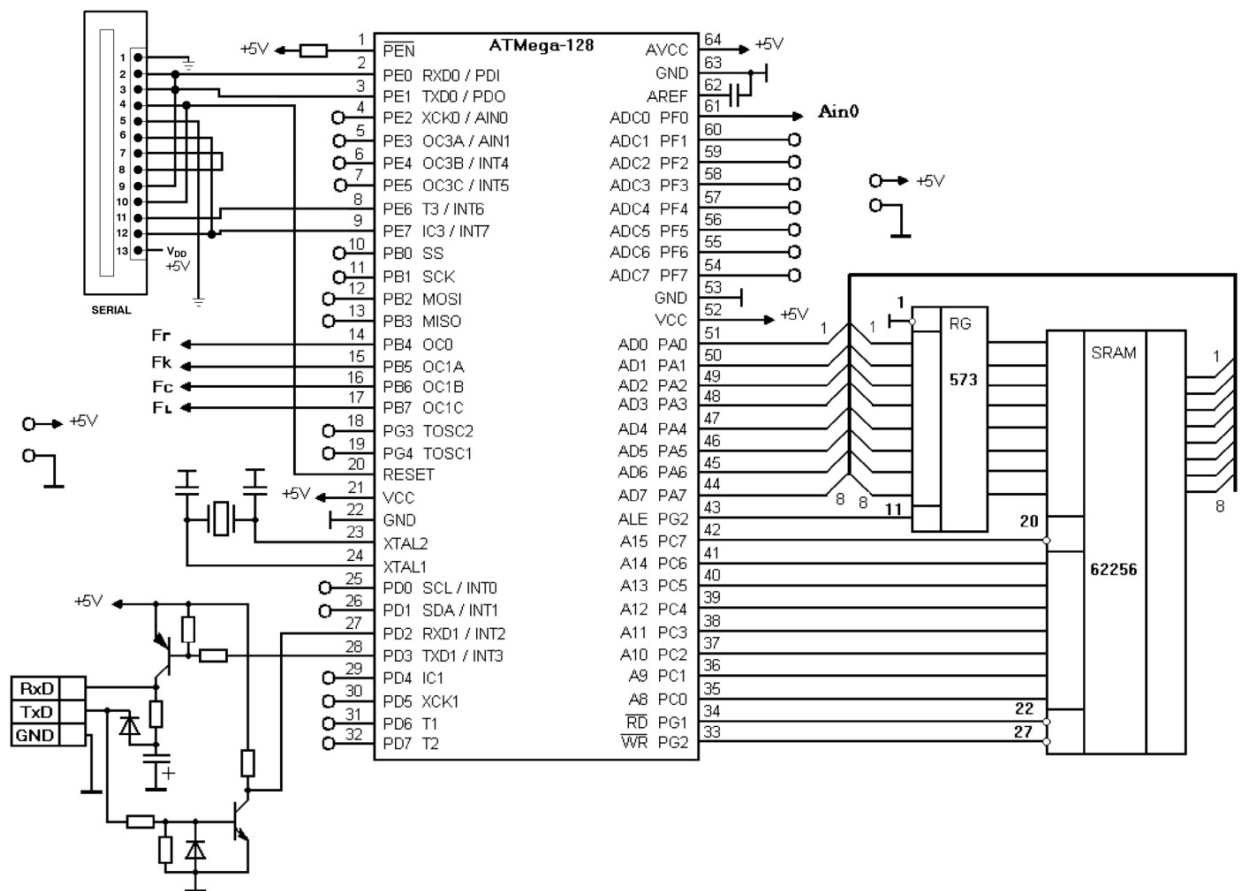


Рис. 3.18. Схема електрична принципова включення фотодіодного детектору TAOS TSL1406R.

Напруга, утворена на аналоговому виході (АТ), визначається за виразом:

$$V_{out} = V_{drk} + (R_e) (E_e) \quad (3.15)$$

де: V_{out} - це аналогова вихідна напруга для білого стану;

V_{drk} - це аналогова вихідна напруга для темного стану;

R - здатність пристрою до заданої довжини хвилі, що подається у $\text{В} / (\text{мкДж}/\text{см}^2)$;

E – інтенсивність падаючого випромінювання в мкВт / см²;

t_{int} - час інтеграції в секундах;

Ще однією характеристикою даного ПЗЗ є значення лагу зображення - це залишковий сигнал, що залишився в пікселі від попередньої експозиції. Він визначається як відсоток сигналу білого рівня, що залишився після того, як піксель піддається «засвітці», за яким слідує період релаксації:

$$IL = \frac{V_{out(IL)} - V_{drk}}{V_{out(white)} - V_{drk}} \cdot 100, \quad (3.16)$$

В основу схеми керування ПЗЗ лінійкою TAOS TSL1406R було покладено мікроконтролерну плату на основі мікропроцесора ATMega128, на якій було побудовано вимірювальний макет та апробовано режими роботи систем ПЗЗ-лінійки. Комп'ютер організовує прослуховування інформації з мікроконтролером і її візуалізацією. Зв'язок із контролером аеромобільної платформи відбувається через інтерфейс RS232.

3.9. Визначення вимірювальних параметрів в контролі дисперсних показників атмосферного повітря.

У процесі визначення інформативних параметрів диспергованих у повітрі часток проводять аналіз показників розсіювання випромінювання частками під малими кутами при дії монохроматичного випромінювання на визначеній довжині хвилі. Спочатку необхідно вибрати перелік інформативних показників, що є оптимальними для реєстрації вимірювальним засобом вибраного схемного рішення, так як інтенсивність випромінювання що розсіюється частками є відносною величиною. Задана умова ускладнює завдання обрахунку вимірювальної інформації, що отримана різними вимірювальними засобами які працюють по даній методиці. Для нормування оптичних неоднорідностей методу, що виникають при вимірюваннях, є доцільним застосування визначених стандартних

методик що дозволяє проводити зіставлення даних отриманих різними вимірювальними засобами.

Вимірювач розглянутого схемного рішення, здатний працювати в декількох режимах, які переналаштовуються (вимірювач дисперсних характеристик повітря, лічильник аерозолів). Результати вимірювань включають наступні показники дисперсності:

- значення розподілу часток по об'єму $W(\rho)$;
- значення рахункової концентрації (відношення кількості частинок на одиницю об'єму) що вимірюється в см^{-3} ;
- відносна площа поверхні частинок;

Робота вимірювача дисперсності ґрунтується на застосуванні методу розсіювання лазерного світла під малими кутами. Враховується індикатриса розсіювання лазерного випромінювання із кутами $\sin(\varphi) \approx \varphi$. В такому випадку індикатрису розсіювання $I(\beta)$ після проходження когерентного лазерного випромінювання через сукупність дисперсних часток атмосферного повітря можна знайти за виразом [5, 6, 32]:

$$I(\beta) = \frac{C}{\beta} \cdot I_0 \cdot \int_0^{\infty} f(\rho) \cdot \rho^2 \cdot J_1^2(\rho\beta) d\rho \quad (3.17)$$

де $\rho = \frac{\pi \cdot d}{\lambda}$ – визначальний коефіцієнт;

d – відносний діаметр дисперсних часток атмосферного повітря;

λ – довжина хвилі лазерного випромінювання що освітлює сукупність аналізованих часток;

β – відносний кут розсіювання випромінювання на частках;

$J_1(\rho\beta)$ – функція Бесселя що визначається за першим порядком;

$f(\rho)$ – відносна щільність часток усієї сукупності відповідно до їх розмірів;

C – постійна методу вимірювання;

I_0 – інтенсивність світлового потоку що діє на дисперговані частки у потоці атмосферного повітря.

Значення функції $f(\rho)$ можна знайти використавши дані індикатриси розсіювання $I(\beta)$ за формулою [5]:

$$f(\rho) = -\frac{\bar{C}}{\beta} \cdot \int_0^{\infty} h_T(\rho\beta) \cdot T(\beta) d\beta, \quad (3.18)$$

Концентрація частинок що відповідає їх кількості відповідно до нормованої функції $f(\rho)$ обчислюється за допомогою закону Бугера – Ламберта – Бера, відповідно до виразів [32]:

$$N = K \cdot d \cdot L^2 \cdot \pi \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (3.19)$$

$$N = \frac{2 \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{\pi \cdot d^2 \cdot L} [\text{cm}^{-3}], \quad (3.20)$$

де N – кількісна концентрація часток у потоці атмосферного повітря на певний момент часу вимірювань;

L – довжина шляху лазерного випромінювання;

I_0 – інтегральна інтенсивність випромінювання щ потрапляє на частки у потоці повітря;

I – відносна інтенсивність випромінювання після проходження повітряного проміжку певної довжини із зваженими в ньому диспергованими частками;

d – середній розмір частинки

K – коефіцієнт екстинкції.

Щоб спростити розрахунки використовують показник об'ємної функції мілкодисперсних часток відповідно до всього об'єму аналізованої проби повітря $W(\rho) \sim N(\rho) \cdot \rho^3$

$$W(\rho) = \frac{2 \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \cdot d}{\pi \cdot L} [\text{mm}^3 / \text{sm}^3] (\text{W} \%), \quad (3.21)$$

Значення показника площі поверхні досліджуваних мікодсперсних часток в атмосферному повітрі можна визначити за виразом:

$$S = \frac{N \cdot \pi \cdot d^2}{N \cdot d^3 \cdot \pi} \cdot 6 [\text{cm}^{-1}], \quad (3.22)$$

У процесі вимірювань, спочатку потрібно провести нормування фону освітленості фотодіодного детектора, після чого проводиться запис вимірювального сигналу що відповідає наявності мілкодисперсних часток у потоці атмосферного повітря. Після перетворення сигналу в фотодетекторі відбувається різницеве віднімання корисного сигналу і фону. У результаті отримується рівень сигналу на всіх 768 елементах фотодетектору TSL1406RS

Фотодіодна лінійка TSL1406R має лінійний діапазон 400 точок на дюйм (DPI), та утворює масив сенсорів, що складається з двох блоків по 384 пікселя, кожен з власним виходом. Розділи вирівнюються щоб утворити суміжний 768×1 піксельний масив. Даний діапазон сигналів отриманий на фотодіодній лінійці розбивається на 96 рівних фрагментів що відповідають кутам спостереження $\beta=0,0034...0,156 \text{ рад}$. Рівень сигналу на кожному діапазоні із 8-ми послідовних пікселів фотодіодної лінійки підсумовуються. (3.8).

Далі проводиться операція згладжування у процесі якої знаходиться масив значень що дозволяє обрахувати об'ємну та рахункову концентрації часток у потоці атмосферного повітря що проходить через кювету. Лазерний випромінювач працює в імпульсному режимі, із частотою до 120 кГц. Опитування фотодіодної лінійки TSL1406R проходить із частотою вибірки 1 кГц, що дозволяє отримати достовірний діапазон даних для усереднення вимірних показників диспергованих часток атмосферного повітря, і в той же час не створює надмірний масив вимірювальної інформації. Після формування первинних даних отриманий масив даних експортується в у форматі *.csv в текстовий файл та зберігається на постійному запам'ятовувальному пристрої до закінчення маршруту польоту. [2, 31].

3.10. Визначення дисперсних показників атмосферного повітря вимірювальною системою на базі аеромобільної платформи R18 Falco

Контроль дисперсних показників повітря проводився відповідно до вимог контролюючих органів що регламентують польоти безпілотних літальних

апаратів. Виміри дисперсних показників повітря проводилися у польовій місцевості біля смт. Гуровщина поблизу Житомирської траси. У якості характеристики дисперсності розмірних включень у повітрі було використано розмірні спектри (функція розподілу частинок по розмірах (d) – відносна величина) на висоті $10\pm 0,5$ м від рівня підстилаючої поверхні (рис. 3.19).

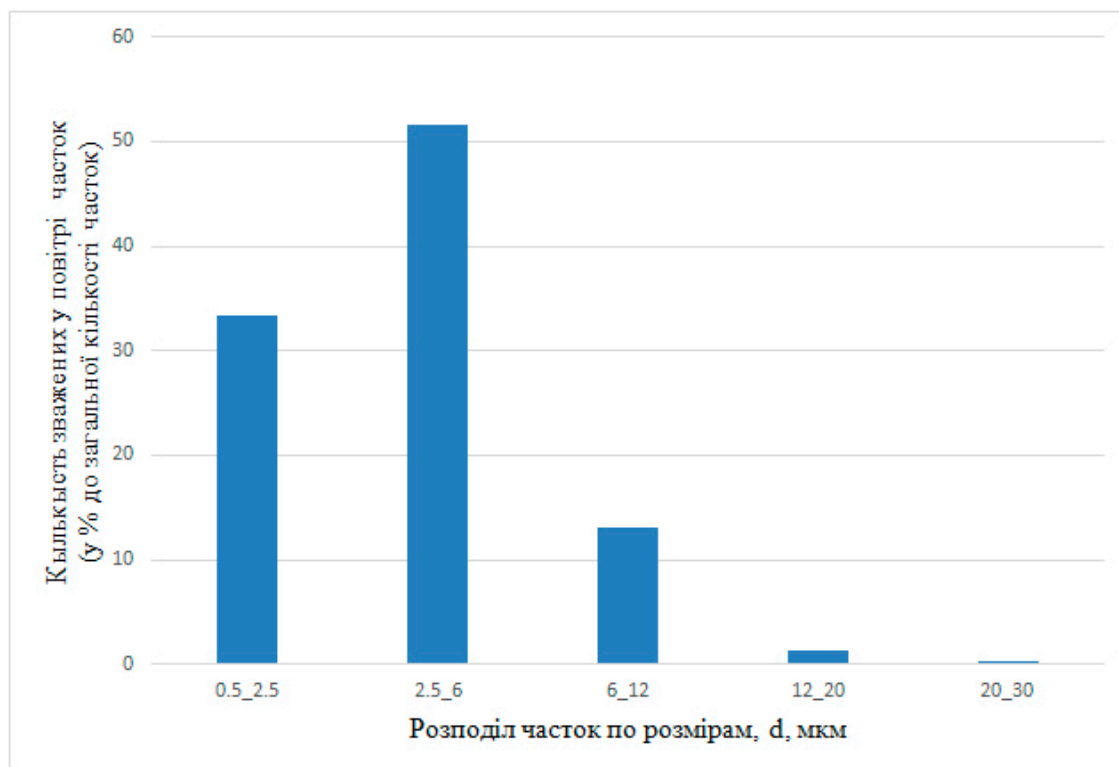


Рис. 3.19 – Розподіл зважених у повітрі часток за розмірами відносно загального об'єму зважених у повітрі часток.

На рис. 3.20 наведені спектр розсіювання зважених у повітрі часток розмірами від 1 до 30 мкм залежно від їх об'ємної концентрації у прокачаному через кюветне відділення вимірювача атмосферному повітрі. За даними витратоміра, було прокачано $10 \cdot 10^3 \text{ см}^3$, тобто 10 стандартних літрів повітря (10 SLM). Результати були усереднені із кроком $1 \cdot 10^3$.

Виміри проводилися у приземному повітрі на висоті 3 м від підстилаючої поверхні. На маршруті слідування аеромобільної платформи FalcoR18 підстилаюча поверхня була із максимальним перепадом висот до 20 см. Підстилаюча поверхня представляла собою поле, на якому вирощувалися зернові культури. Дана висота (3м) була вибрана зважаючи на те, що при

польоті на даній висоті на підстилаючу поверхню не впливають гвинти аеромобільної платформи. Таким чином зменшується похибка вимірювань викликана пилом, що підіймається із підстилаючої поверхні внаслідок дії вихрових потоків від гвинтів аеромобільної платформи. Напрямок руху аеромобільної платформи був прямолінійним зі збереженням постійної висоти $3 \pm 0,2$ м та горизонтальної швидкості на рівні $2 \pm 0,1$ м/с.

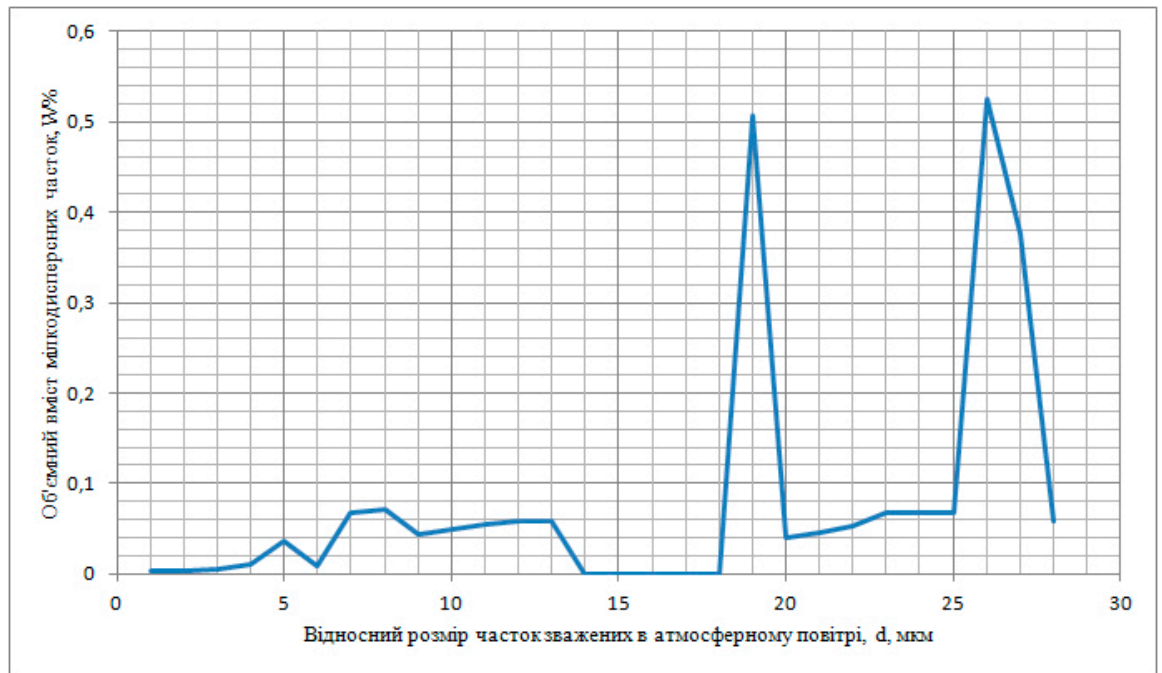


Рис. 3.20 – Об'ємний розподіл зважених у приземному шарі повітря часток у діапазоні розмірів 1-30 мкм.

За результатами вимірів видно, що у приземному повітрі переважають частки великих розмірів, із відносним діаметром 20 та 25 мкм. Це пов'язано із перенесенням вітром пилу, що знаходиться на підстилаючій поверхні маршруту слідування аеромобільної платформи FalcoR18.

В подальшому, було проведено виміри рахункової концентрації зважених у повітрі часток на висоті 100 м відносно підстилаючої поверхні. Для збереження відтворюваності вимірів через кюветне відділення вимірювача було прокачано $10 \cdot 10^3$ см³, тобто 10 стандартних літрів повітря (10 SLM). Результати були усереднені із кроком $1 \cdot 10^3$.

У даній серії вимірів визначалися рахункова концентрація зважених у повітрі часток (N) відповідно до їх розподілу за відносним розміром.

Результати вимірювань наведено на рис. 3.21.

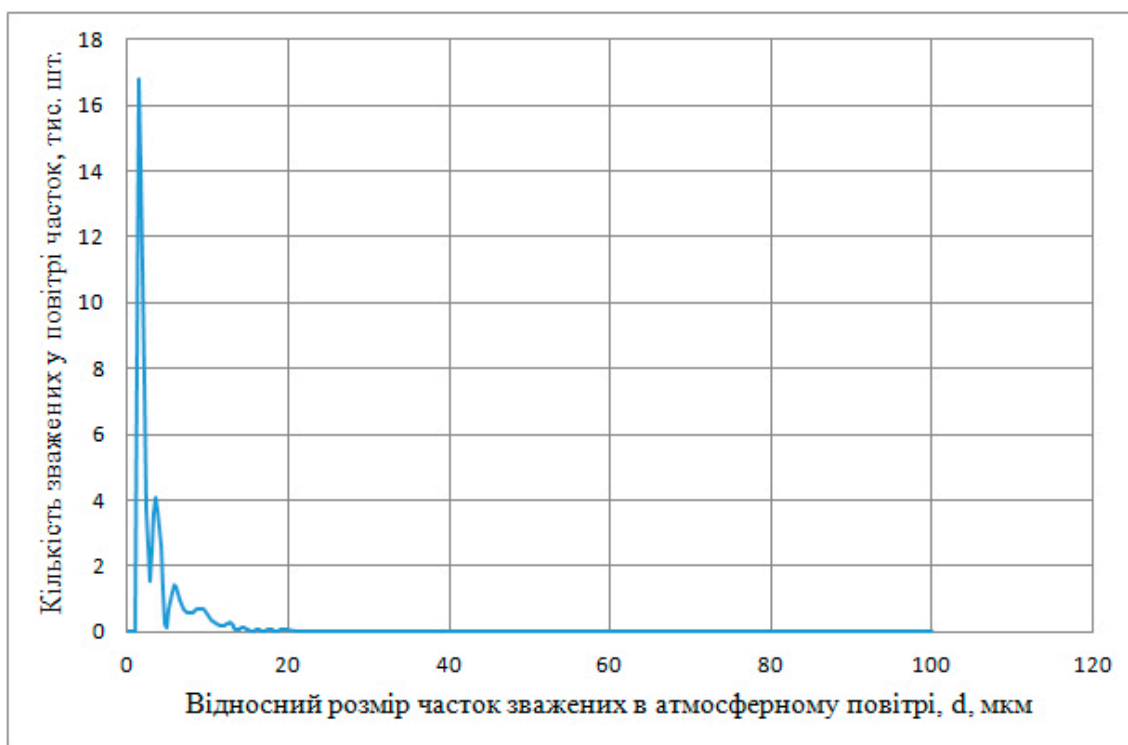


Рис. 3.21 – Рахункова концентрація зважених у повітрі часток розмірів 1-100 мкм на висоті 100 м від рівня підстилаючої поверхні.

Результати вимірювань показують, що на висотному горизонті 100 м від рівня підстилаючої поверхні переважають зважені частки розмірністю від 1 до 5 мкм. Отримані результати показують актуальність даного методу та засобу моніторингу дисперсних показників повітря відповідно до стандарту контролю часток PM_{2.5}:FSP (fine suspended particles).

За стандартом PM_{2.5}:FSP визначаються зважені у повітрі частки розмірами до 2,5 мкм, до складу яких входять як тверді мікрочастинки, так і аерозолі (дрібнодисперсні зважені у повітрі частки, тонкодисперсний пил). Всі ці частинки розміром менше 2,5 мкм знаходяться в повітрі у зваженому стані. Відносний вміст часток розміру PM_{2.5} є одним із основоположних показників що дозволяє оцінити якість повітря та його безпеку для людини.. Відповідно до положень Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) рівень забруднення повітря частками розміру PM_{2.5} у місцях проживання людей повинен складати у межах до 25 мкг/м³.

Розглянутий метод малокутового розсіювання та засіб дистанційного контролю дисперсних показників атмосферного повітря на базі аеромобільної платформи уможовілює оцінити розміри частинок по числу коливань залежно $R(\lambda)$.

Результати вимірів показали хорошу здатність градування при виборі в якості пояснюючої (незалежної) змінної числа N коливань (биття) залежно $R(\lambda)$. N визначається з похибкою, що не перевищує чверть коливання, за рахунок застосування спеціальних математичних методів. Для наближених оцінок розмірів частинок градувальну залежність можна побудувати без залучення експериментальних даних, за спектрами математичних еталонів, отриманих розрахунковим шляхом.

Висновки до розділу 3

Проведено огляд аеромобільних платформ великої вантажопідйомності та обґрунтовано вибір аеромобільної платформи для розміщення малокутового вимірювача дисперсних показників атмосферного повітря. Апробовано систему управління, контролю аеромобільної платформи «FalcoR18» у завданнях екологічного моніторингу.

Розглянуто конструктивні особливості вимірювального модулю контролю показників дисперсності атмосферного повітря методом малокутового розсіювання. Визначено вимірювальні параметри зважених у повітрі часток, придатні до вимірювання лазерним малокутовим вимірювачем.

Застосовано проточну кювету вимірювального модулю. Вибрано витратомір GFS131 вимірювальної системи для контролю об'ємних витрат атмосферного повітря. Розраховано функцію перетворення витратоміра та оцінено компенсаційний вплив значень відносної вологості атмосферного повітря. Оцінено теплову інерційність термодатчика витратоміра.

Проведено виміри дисперсних показників атмосферного повітря.

4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ДИСПЕРСНОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ НА БАЗІ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ»

Проблема забруднення повітря - одна з головних у багатьох мегаполісах і містах з великою промисловістю. З розвитком технологічного методу контролю за забрудненням повітря за допомогою безпілотних літальних апаратів став ефективніший контроль за допомогою передніх еколого-лабораторних лабораторій, так як БПЛА може дати повну картину, що виникає в будь-якій точці тримірного простору.

Аналіз складу повітря при допомозі БПЛА має багато переваг порівняно із стаціонарним лабораторним аналізом. Це дозволяє економити засоби та час доставки отриманих результатів у лабораторію дослідження. При проведенні аналізу на місці, як правило, не потрібні висококваліфіковані виконавці, так як застосовуються більш прості засоби аналізу. Найголовніше достоїнство такого дослідження полягає в тому, що об'єкт аналізу який досліджується дистанційним засобом об'єктивного контролю, до якого можна віднести БПЛА з вимірювальним модулем, важко дослідити в стаціонарній лабораторії. Така ситуація може мати місце коли якісні або кількісні показники досліджуваного об'єкту мають властивість змінюватися у часі та просторі. Це особливо актуально для контролю дисперсних показників атмосферного повітря, так як еромобільна платформа дозволяє проводити аналіз атмосферного повітря у широкому інтервалі висотних діапазонів без прив'язки до конкретного місця проведення вимірів.

4.1 Опис ідеї проекту

В цьому розділі буде проведено аналіз стартап проекту що має на меті визначити чи є продукт конкурентноспроможним із іншими продуктами які вже зайняли свою нішу на ринку. І Ідея проекту полягає системі контролю дисперсності атмосферного повітря на , що уточнено наведено в табл.4.1.

У таблиці 4.1 зображено зміст ідеї і безпілотного літального апарату та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи побазтенційних клієнтів.

Таблиця 4.1 - Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Система контролю дисперсності атмосферного повітря на базі безпілотного літального апарату	За допомогою мультикоптерів проводять різні аналізи, в їх кількості: аналіз забруднень радіоактивним вилученням; аналіз хімічних забруднень повітря; аналіз забруднення повітря підприємствами. Надає повну картину, що виникає в будь-якій точці тримірному простору	Мультизадачність
	Винахід відноситься до вимірювальної техніки, призначений для дисперсності атмосферного повітря	Багатофункціональний прилад

Отже, пропонується новий спосіб система контролю дисперсності атмосферного повітря на базі безпілотного літального апарату.

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

- визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;

- визначаємо попереднє коло конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

- проводимо порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначено показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект <i>FalcoR18 Dispersion analisator</i>	Конкурент1 <i>DJI Matrice 600 Pro</i>	Конкурент2 <i>Freefly ALTA 8</i>	Конкурент3 <i>Versadrones Heavy Lift Octocopter</i>			
1.	Вартість програмного забезпечення	17000	28000	34000	42000	-	-	+
2.	Ємкість акумуляторів та кількість	4 шт удосконалені	2 шт	2 шт	2 шт	-	-	+
3.	Макс. швидкість	60 км/г	45 км/ГОД	30 км/ГОД	40 км/ГОД	-	-	+
4.	Макс вага навантаження	від 5 кг	15 кг	8 кг	12 кг	-	+	-
5.	Відстань проходження	від 5 км	5 км	2,5 км	5 км	-	-	+
6.	Вартість обслуговування	6700	11500	9200	12800	-	-	+
7.	Торгова марка	-	+	+		+	-	-

Після порівняння характеристик проекту з головними конкурентами був визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик і властивостей ідеї потенційного товару, що є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

Порівнявши свій проект з конкурентами DJI Matrice 600 Pro [35], Freefly ALTA 8 [36], Versadrones Heavy Lift Octocopter [37-38] було проаналізовано перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідей потенційного товару що є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

В межах даного підрозділу проводимо аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею створення проекту.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових які вказані в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Система контролю дисперсності атмосферного повітря на базі безпілотного літального апарату	Метод змінного перепаду тиску	У відкритому доступі	Доступний
		Метод постійного перепаду тиску	У відкритому доступі	Доступний
		Ультразвуковий метод	У відкритому доступі	Доступний
		Методу малокутового розсіювання	У відкритому доступі	Доступний
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: система контролю дисперсності атмосферного повітря на базі безпілотного літального апарату із застосуванням методу малокутового розсіювання				

Проаналізувавши таблицю можна зробити висновок що наш проект можна реалізувати за допомогою більшості методів, які доступні на даний момент, але серед доступних нам ми обираємо метод тахометричний та будемо використовувати його для реалізації нашої ідеї

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартаппроекту

Визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації.

Це дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 4.4).

Таблиця 4.1 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	3
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	1650000 (165000·10)
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Патентування продукту, середня конкуренція, високий показник якості обслуговування.
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ДСТУ 2.1.6.575-96. Гігієнічні вимоги до охорони атмосферного повітря населених місць. Санітарні правила та норми
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	85%

За результатами аналізу таблиці можна зробити висновок що ринок є привабливим для входження за попереднім оцінюванням. Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 4.5).

Таблиця 4.2. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п / п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Проведення контролю дисперсності атмосферного повітря на базі безпілотного літального апарату	1.Підприємств а різних форм власності 2.Контролююч і лабораторії 3.Підприємств а які реалізують небезпечну продукцію	Особисті технічні стандарти встановлені на підприємства х. Державні стандарти Технічна підтримка на певний період з можливістю продовжити.	- до продукції Невеликі розміри приладу. Можливість проведення досліджень в польових умовах. Невелика чутливість приладу до зовнішніх чинників. Можливість виведення результатів на комп'ютер. Безперебійна робота приладу. Зрозуміле управління приладом. Великий термін експлуатації. - до компанії-постачальника Відповідність приладу заданим характеристикам. Можливість технічної підтримки при виникненні проблем. Інструктаж по роботі з приладом.

При застосуванні даної технології існують певні загрози. (таблиця 4.6).

Таблиця 4.3 - Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Можливість появи на ринку іноземних аналогів з кращими характеристиками і нижчою ціною.	Вивчення продукції конкурентів та вдосконалення своєї, для задоволення всіх потреб користувачів.
2.	Інфляція	Зміна курсу гривні, за рахунок чого можуть зменшитися продажі	Реалізація продукту в більш стабільній (іноземній) валюті та моніторинг економічної ситуації в країні
3.	Наявність локального конфлікту на сході	Може вплинути на коло потенційних покупців.	Пошук нових клієнтів на міжнародному ринку
4.	Постачання	Проблема з фірмами постачальниками	Зміна політики розповсюдження продукту
5.	Технічний	Збої в роботі програмного забезпечення приладу.	Спрощення алгоритмів налаштування або впровадження постійної підтримки кваліфікованих техніків

Наявність певних загроз реалізації продукції дозволить нам вчасно вдосконалювати прилад та завжди бути в курсі всіх наукових новинок та економічної ситуації в країні.

Але поряд із колом загроз існують і певні можливості (таблиця 4.7).

Таблиця 4.4 - Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Науково-технічні	Зміниться технологія виготовлення товару.	Впровадження більш економічно вигідних методів, що дозволять зменшити собівартість приладу.
2.	Попит	Збільшення попиту на товар на ринку.	Збільшення продажів, а відповідно і прибутків компанії
3.	Економічні	Політика протекціонізму; підтримка інноваційного виробництва.	Підвищення/пониження ціни на продукт; зменшення податкового тиску
4.	Політико-правові	Може вплинути на купівлю/продаж товару.	Зміна напрямків імпорту
5.	Екологія	Підвищення зацікавленості людей впливу різних речовин і продуктів на навколишнє середовище.	Реклама своєї продукції яка допомагає виявити підприємства які мають попит на товар.

Таблиця 4.5 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції	Олігополія	Можливість домовленості з іншими олігополістами для отримання взаємної вигоди
2. Рівень конкурентної боротьби	Національний	Вдосконалення продукту і пошук можливості виходу на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою	Міжгалузева	Розширення ринку за рахунок збільшення попиту
4. Конкуренція за видом товарів	Товарно-видова	Вдосконалення та реклама для показу переваг
5. За характером конкурентних переваг	Нецінова	Вдосконалення свого продукту і при цьому невелике зменшення цін відносно конкурентів
6. За інтенсивністю	Не марочна	Розробка бренду і його активна реклама

Після аналізу конкуренції проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі.

Таблиця 4.6 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	На даний момент на ринку присутні 3 прямі конкуренти, які займаються виготовленням даного обладнання.	Потенційними конкурентами є іноземні компанії які згодом можуть вийти на наш ринок. Патенти на продукти. Законодавчі обмеження. Гнучкі ціни.	Постачальниками є компетентні інтернет магазини. Диференціація витрат. Концентрація постачальників. Значення розміру поставок	Основними клієнтами є установи та підприємства.	Доступні аналоги присутні, але в нашій компанії дуже вигідні цінові пропозиції

Продовження таблиці 4.8

Висновки:	Проводити аналіз конкурентних пропозицій, працювати над зниження собівартості.	Високий ризик виходу нових гравців, адже вхідні бар'єри є не дуже високими. потенційних конкурентів немає	Оскільки доволі багато постачальників, тому вони не диктують умови роботи на ринку.	Для задоволення потреб клієнтів потрібно розробляти нові пропозиції і підтримувати якість продукту. Адже все важливішим стає питання ціни	Підтримувати хороші позиції на ринку та конкурентну перевагу, розробляти нові види товарів
-----------	--	---	---	---	--

Після всіх аналізів визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності.

Таблиця 4.7 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Ціна	Підтримка зворотного зв'язку з клієнтами, усунення проблем при проведенні вимірювань, вдосконалення приладу, збільшення попиту на продукт, що в результаті дозволить знизити ціну.
2.	Велика кількість постачальників	Наявність приладу та своєчасна доставка продукту клієнту.
3.	Висока якість	Висока якість і точність приладу, яка дозволяє клієнту отримувати максимально точний результат вимірювань.
4.	Технічна підтримка	Наявність досвідчених спеціалістів, які зможуть швидко вирішити будь яку проблему в роботі приладу.
5.	Наявність патентів	Наявність патенту на приладу, дає споживачу впевненість в тому що він купує сертифікований продукт

Таблиця 5.8. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін вимірювача дисперсності повітря на базі аеромобільної платформи «FalcoR18 Dispersion analisator»

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з нашим приладом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Наявність патентів	14	+						
2	Велика кількість постачальників	18				+			
3	Висока якість	18					+		
4	Технічна підтримка	19						+	
5.	Ціна	20							+

З таблиць 4.10 та 4.11 бачимо, що фактори конкурентоспроможності суттєві та мають великий позитивний внесок. Основною перевагою та головним досягненням є висока якість продукту та технічна підтримка на протязі всього терміну його використання споживачем.

Таблиця 4.9. SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <p>Вартість обслуговування</p> <p>Технічна підтримка</p> <p>Висока якість</p> <p>Новітні технології</p> <p>Попит</p> <p>Ємкість акумуляторів та кількість</p> <p>Макс. швидкість</p> <p>Відстань проходження</p>	<p>Слабкі сторони:</p> <p>Компанії необхідно збільшувати кількість його постачальників, оскільки на ринку багато рітейлерів і клієнти мають великий вибір</p> <p>Клієнти обирають продукт що має торгову марку і сертифікований в Україні і це призводить до втрати потенційного заробітку.</p>
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Зміниться технологія виготовлення товару. 2. Збільшення попиту на товар на ринку. 3. Політика протекціонізму; підтримка інноваційного виробництва. 4. Може вплинути на купівлю/продаж товару. 5. Підвищення зацікавленості людей впливу різних речовин і продуктів на навколишнє середовище. 	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Можливість появи на ринку іноземних аналогів з кращими характеристиками і нижчою ціною. 2. Зміна курсу національної валюти, за рахунок чого можуть зменшитися продажі 3. Може вплинути на коло потенційних покупців. 4. Проблема з фірмами постачальниками. 5. Систематичні збої в роботі приладу.

На основі SWOT-аналізу розробляємо альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл.13).

Таблиця 4.10 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу	Висока	6 міс. - 1 рік
2.	Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями	Висока	1,0-1,5 року
3.	Стратегія виходу з ринку	Низька	

З зазначених альтернатив обираємо стратегію компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 4.11 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Промислові компанії	Середня	Залежить від рівня та темпу економічного розвитку в цілому та розвитку контролю виходу метану в біоенергетичному виробництві	Висока	Високі бар'єри входу на ринок
2.	Державні лабораторії контролю за якістю.			Середня	Середні бар'єри входу на ринок
3.	Провідні інститути			Середня	Середні бар'єри входу на ринок
Які цільові групи обрано: Під час аналізу потенційних груп споживачів було прийнято рішення що компанія буде працювати із промисловими компаніями.					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів ми обрали цільові групи для яких будемо пропонувати свій прилад та визначили стратегію охоплення ринку: стратегію диференційованого маркетингу – промисловими компаніями. Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл.4.15).

Таблиця 4.12 - Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1.	Підсилення сильних сторін стартапу за рахунок ринкових можливостей	Диференційований маркетинг	Надійний продукт, до якого прихильні споживачі, постійний зворотній зв'язок з клієнтами.	Стратегія диференціації

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16).

Таблиця 4.13 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1.	Ні	Передбачається розвиток ринку	Ні, не буде. Буде створено унікальну продукцію	Зайняття конкурентної ніші

На основі вимог споживачів з обраного сегменту до постачальника і продукту, а також в залежності від стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування яка визначається у формування ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект (табл. 4.17).

Таблиця 4.14 - Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Вдосконалення продукту враховуючи побажання споживачів	Стратегія диференціації	Висока якість продукту. Формування лояльності і прихильності споживачів, підтримка вхідних бар'єрів.	Якість. Ціна. Зворотній зв'язок із виробником. Технічна підтримка.

Результатом даного підрозділу є система рішень щодо ринкової поведінки компанії, вона визначає в якому напрямі буде працювати компанія на ринку

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Під час розроблення маркетингової програми першим кроком є розробка маркетингової концепції товару, який отримає споживач. У таблиці

4.18 підсумовуємо результати аналізу конкурентоспроможності товару, та опис трьох рівнів моделі товару у таблиці 4.19.

Таблиця 4.15. - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Контролю дисперсності атмосферного повітря на базі безпілотного літального апарату	Проведення різних аналізів, в їх кількості: аналіз забруднень радіоактивним вилученням; аналіз хімічних забруднень повітря; аналіз забруднення повітря підприємствами Надає повну картину, що виникає в будь-якій точці тримірного простору.	Постійна технічна підтримка. Безперебійна робота приладу. Систематизація та спрощення обробки результатів досліджень.

Таблиця 4.16 - Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Система контролю дисперсності атмосферного повітря на базі безпілотного літального апарату із застосуванням тахометричного методу. Можна виділити наступні вигоди використання: проведення різної кількості аналізів забруднень радіоактивним вилученням; аналіз хімічних забруднень повітря; аналіз забруднення повітря підприємствами. Надає повну картину, що виникає в будь-якій точці тримірного простору.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Н м	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1.Довговічність (немає строку давності)	Нм	Тх
	2. Гарантійний термін (довгий термін гарантійного обслуговування)	Нм	Е
	3.Практичність виробничого виконання (Практичний дизайн)	Нм	Тл
	4.Вартість обслуговування (Низька вартість обслуговування)	Нм	Вр
	Якість: відповідає нормам ДСТУ 2.1.6.575-96. Гігієнічні вимоги до охорони атмосферного повітря населених місць. Санітарні правила та норми		
	Пакування: програмне забезпечення записане на компакт диск.		
Марка: відсутня			
III. Товар із підкріп- ленням	До продажу користувач може протестувати прилад		
	Після продажу один раз в квартал клієнта буду відвідувати спеціаліст для налаштування, усунення несправностей у роботі приладу.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Від копіювання товар буде захищено шляхом патентування коду (отримання сертифікату про інтелектуальну власність) та надання кожній проданій копію індивідуального ліцензійного коду який необхідно вводити при запуску приладу.			

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватися при встановленні ціни на потенційний товар, це передбачає аналіз цін товарів конкурентів, та доходів споживачів продукту (табл. 4.20).

Таблиця 4.17 - Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	175-450 тис. грн.	210-420 тис. грн.	20-50 млн. грн.	150-180 тис. грн

Пропонована нами вимірювальна система на базі аеромобільної платформи має значну цінову перевагу перед аналогами.

Таблиця 4.18. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Покупка товару один раз (з продовженням терміну експлуатації програмного забезпечення)	Доставка товару покупцю, його встановлення та налаштування.	Канал збуту нульового рівня	Мережа інтернет

Після початку продаж планується розробка та індексування власного сайту в мережі інтернет для просування вимірювального засобу для більш широкого кола користувачів.

Таблиця 4.19 - Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Необхідність контролю дисперсності атмосферного повітря на базі безпілотного літального апарату	Мережа інтернет, виставки, семінари, друкована продукція.	Профільні сайти мережі інтернет SEO оптимізація рекламної інформації Відгуки та рекламації клієнтів на власних сайтах	Проінформувати клієнта про те, що за допомогою приладу стає можливим максимально зручно контролювати дисперсність атмосферного повітря	Ми знаємо чим ви дихаєте! Заважає вільно дихати повітря на підприємстві? – ми знайдемо вашу проблему!
	Зменшення витрат на експлуатаційне обслуговування				

Результатом даного підпункту є ринкова програма яка включає концепцію збуту, просування, аналіз ціноутворення, вона залежить від цінностей та потреб потенційних клієнтів, переваги ідеї, стану ринку на якому буде впроваджено проект на даний момент та його динаміку, та відповідну обрану альтернативу поведінки на ринку.

4.6 Висновки до розділу 4

Узагальнюючи проведений аналіз стартап проекту можна зробити висновок що з огляду на потенційні групи клієнтів перспективи впровадження проекту є високими. Але, за рахунок того, що на ринку вже є присутні аналоги продукту із зареєстрованими товарними марками, системою ритейлерів, та налагодженими каналами збуту – бар'єр входження на ринок є досить високим. Тому для успішного виходу ринок та зацікавленості цільової групи клієнтів необхідно забезпечити нашому продукту властивостей які будуть виділяти його серед конкурентів. На даний момент продукт є конкурентоспроможним.

Для забезпечення ефективних продаж вимірювального засобу та інформування потенційних клієнтів із особливостями його роботи, рекомендованими умовами технічної експлуатації – доцільно проведення публічної презентації результатів проекту серед цільової групи користувачів та широкого кола науковців на профільних заходах.

Необхідно надати можливість проведення тестових вимірювань приладом на протязі серії робочих днів з можливістю залучення сторонніх фахівців для навчання персоналу замовника.

Планується участь у профільних виставках, наукових конференціях із демонстрацією роботи приладу. Основною маркетингової стратегією реалізації продукту серед цільової групи клієнтів є проведення дієвої рекламної компанії за допомогою електронних ресурсів.

Важливим є зворотній зв'язок з клієнтами, удосконалення вимірювального засобу відповідно до рекламаций клієнтів що виникли в процесі його технічного обслуговування

Враховуючи мілкосерійне виробництво вимірювального засобу (до 10 од. в рік) для ринкової реалізації проекту можна обрати початок продаж нашого продукту в мережі інтернет для одного сегменту ринку (транспортно-логістичні компанії). Після закріплення на ринку доцільно починати шукати клієнтів в інших сегментах та розширювати канали збуту.

ВИСНОВКИ

У процесі роботи над магістерською дисертацією були отримані наступні результати:

1. Проведено аналіз складу атмосферного повітря та фізико-хімічних характеристики часток диспергованих в повітряному середовищі. Розглянуто методики організації спостережень за рівнем забруднення атмосфери. При визначенні приземної концентрації домішки в атмосфері відбір проб і вимірювання концентрації домішки проводяться на висоті 1,5 ... 3,5 м від поверхні землі.

2. Зроблено огляд методів та засобів контролю зважених у повітрі часток. Вибрано метод малокутового розсіювання лазерного випромінювання. Розглянуто та обгрунтовано схемне рішення вимірювача дисперсних показників атмосферного повітря методом мало кутового розсіювання.

3. Проаналізовано залежність спектру розсіяного випромінювання від розмірних параметрів часток атмосферного повітря. В результаті виміру світлового потоку розсіяного об'єктом під різними кутами можна побудувати індикатрису розсіювання – криву, що графічно відображає відмінність в інтенсивності світла, розсіяного в різних напрямках. Метод лазерної інтерферометрії дозволяє отримати картину розсіяного світла що проходить через дисперсну фазу із зваженими у ній частками..

4. Проведено огляд безпілотних аеромобільних платформ великої вантажопідйомності. Обгрунтовано вибір аеромобільної платформи FalcoR18, придатної для розміщення вимірювача дисперсних часток атмосферного повітря. Апробовано система управління та контролю аеромобільної платформи «FalcoR18» в завданнях екологічного моніторингу.

5. Обгрунтовано конструктивні особливості вимірювального модулю контролю показників дисперсності атмосферного повітря. Вимірювач мало кутового розсіювання застосовується для вимірювання наступних показників

зважених у повітрі часток: відносний середній діаметр (D_{avr}) частки, рахункова концентрація або кількість часток у одиниці об'єму (N_{sm}^3), середня об'ємна концентрації (W%) часток у потоці повітря при проходженні через кюветне відділення вимірювача.

5. Зроблено вибір ПЗЗ TSL1406R у якості первинного вимірювального перетворювача (ПВП) та схеми включення із застосуванням мікроконтролеру ATmega128. Фотодіодна лінійка TSL1406R має лінійний діапазон 400 точок на дюйм (DPI), та утворює перетворює інтенсифікації інтерференційної картини, що відповідає розмірним спектрам зважених у повітрі часток, в сигнал вимірювальної інформації. Визначено вимірювальні параметри в контролі дисперсних показників атмосферного повітря.

6. Виконано підбір кварцової проточної кювети вимірювального модулю. Вибрано витратомір GFS131 та розраховано його функцію перетворення. Оцінено компенсацію похибок що спричинені зміною відносної вологості атмосферного повітря застосуванням вбудованого датчику вологості SHT витратоміру GFS131. Оцінено теплової інерційності термодатчика витратоміра

7. Проведено апробацію малокутового вимірювача дисперсності повітря на базі аеромобільної платформи FalcoR18 із застосуванням напівпровідникової фотодіодної лінійки ПЗЗ TSL1406R у якості фотодетектору. Виміри дисперсних показників зважених у повітрі часток проводилися у приземному шарі повітря із збереженням постійної висоти $3 \pm 0,2$ м та горизонтальної швидкості на рівні $2 \pm 0,1$ м/с. За результатами вимірів видно, що у приземному повітрі переважають частки великих розмірів, із відносним діаметром 20 та 25 мкм

8. Було проведено виміри рахункової концентрації зважених у повітрі часток на висоті 100 м відносно підстилаючої поверхні. Результати вимірювань показують, що на висотному горизонті 100 м від рівня підстилаючої поверхні переважають зважені частки розмірністю від 1 до 5 мкм.

8. Отримані результати показують актуальність даного методу та засобу моніторингу дисперсних показників повітря відповідно до стандарту контролю часток PM_{2.5}:FSP та PM₁₀:FSP (fine suspended particles). За стандартом PM_{2.5}:FSP визначаються зважені у повітрі частки розмірами до 2.5 мкм.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андруз, Дж. Введение в химию окружающей среды / Андруз Дж. и др; под общ. ред. Андруз Жд. - М.: Мир, 1999. - 271 с.
2. Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе и воде. Изд. 2-е, пер. и доп. Л.: Химия, 1985. – 456 с.
3. Справочник по пыле- и золоулавливанию. /Под ред. Русанова А.А. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 312 с.
4. Руководящий документ. Руководство по контролю загрязнения атмосферы РД 52.04.186-89. - М.: Минздрав, 2001. - 603 с.
5. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1995. - 272 с.
6. Берлянд, М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. - 448 с.
7. Штокман Е.А. Очистка воздуха. - М.: Изд-во АСВ, 1999. -319 с.
8. Кузнецов И.Е., Троицкая Т.М. Защита воздушного бассейна от загрязнений вредными веществами химических предприятий. - М.: Химия, 1979. - 344 с.
9. Муравьев С.И. и др. Справочник по контролю вредных веществ в воздухе.- М.: Химия,1988.-319с.
10. Гродзовский М.К. Анализ воздуха в промышленных предприятиях. Л.: Машиностроение, 1987. – 408 с.
11. Коузов П.А., Скрябин Л Я. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей. - Л.: Химия, 1983, 143с.
12. Атмосферный аэрозоль/ Кондратьев К.Я., Москаленко Н.ИИ Поздняков Д.В., 1983
13. Аэрозоли - пыли, дымы и туманы /Грин Х., Лейн В. 2-е издание, 1992
14. Сморгачев В.И., Собкова Е.А. Электрохимические сенсоры для измерения концентрации токсичных компонентов в воздухе// Современные методы и приборы анализа состава газовых и жидких сред: Сб. научн. трудов АО «Укрналит». - К.: 1995.- С. 67-72.

15. Щербань А.Н. Примаков А.В., Копейкин В.И. Автоматизированные системы контроля запыленности воздуха. - К.: Техника, 1978. – 158 с.
16. Горелик Д.О., Конопелько Л.А., Панков Э.Д. Экологический мониторинг. Оптико-электронные приборы и системы. В 2-х томах. Санкт-Петербург.:Крисмас, 1998.-592с.
17. Альперин В.З. и др. Современные электрохимические методы и аппаратура для анализа газов в жидкостях и газовых смесях. М.: - Химия, 1987. – 183с.
18. Барковский В.Ф. и др. Физико-химические методы анализа. -М.: Высшая школа,1972.-344с.
19. Кузьмин В.М., Миндюк Я.Л., Ощенко С.Л. Нефелометр-анализатор малых концентраций промышленных аэрозолей.//Измерит. техн. – 1985. – №3. – с.51-55
20. Бабак В.П., Миндюк Я.Л. Нефелометричні аналізатори аерозолів.// Вестник ХГТУ. – 1997. – №2. – с.7-31.
21. Сидняев, Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных : учебное пособие / Н.И. Сидняев. – М. : Юрай: ИД Юрайт, 2011. – 399 с.
22. Криксунов Л.З, Справочник по основам ИК техники. - М.: Феникс, 1988. – 316 с.
23. Полупроводниковые фотоприемники УФ, видимого и ближнего ИК диапазона спектра./ под ред. Стафеева - М.: Радио, 1994. – 364 с.
24. Мультикоптер DJI Matrice 600 + Free M600 battery Case * 1 + M600 Hex charger * 1 / [Электронный ресурс] <https://dji-kyiv.com/multikopter-dji-matrice-600-free-m600-battery-case-1-m600-hex-charger-1/>
25. Новый профессиональный октокоптер Freefly ALTA 8 / [Электронный ресурс] – <https://coptertime.ru/reviews/novelty/novyuy-professionalnyy-oktokopter-freefly-alta-8/>
26. Vulcan black widow / [Электронный ресурс] – <https://www.professional-multirotors.com/product/vulcan-black-widow-x8-1100mm-folding>.

27. Versadrones Heavy Lift Octocopter / [Електронний ресурс] – <https://www.pinterest.ca/pin/197243658663838873/>
28. «FalcoR18» / [Електронний ресурс] – <https://ek.ua/ek-list.php?katalog>
29. Аеромобільна платформа «FalcoR18» / [Електронний ресурс] – <http://hobbyclub.com.ua/client/models/view/10504>
30. Falco / [Електронний ресурс] – <http://www.demetra5.kiev.ua/ru/catalog/seaeye/rovfalcon>
31. TAOS TSL1406R / [Електронний ресурс] – <https://datasheetspdf.com/pdf/672327/TAOS/TSL1406R/1>
32. Матеріали науково-практичної конференції III екологічного Форуму «Екологія промислового регіону»/ Навчальні матеріали онлайн [Електронний ресурс] – <http://ecology.donoda.gov.ua/wp-content>
33. Micro Flow Sensor/ GFS131/ [Електронний ресурс] – <https://www.gaimc.com/Uploads/Download/Flow/GFS131%20Micro%20flow%20Sensor.pdf>
34. GFS131 / [Електронний ресурс] – https://www.gamicos.com/products/ventilator-flow-sensor/GFS131_ventilator_flow_sensor.
35. DJI Matrice 600 Pro / [Електронний ресурс] – <https://dji-kyiv.com/multikopter-dji-matrice-600-free-m600-battery-case-1-m600-hex-charger-1>
36. Freefly ALTA 8 / [Електронний ресурс] – <https://www.ebay.com/itm/FREEFLY-ALTA-8-UAS>
37. Versadrones Heavy Lift Octocopter / [Електронний ресурс] – <http://versadrones.com/products/heavy-lift-octocopter/>
38. Versadrones Heavy Lift Octocopter / [Електронний ресурс] – <http://versadrones.com/strona/heavy-lift-octocopter-uav/>
39. Підвищення рівня техногенної безпеки у населених пунктах шляхом зниження забруднення повітря автотранспортними засобами / Навчальні матеріали онлайн [Електронний ресурс] – https://ldubgd.edu.ua/sites/default/files/3_nauka/konkurs/dispersni_chastinki.pdf